



REUPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTER DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen

Faculté de technologie

Département de Génie Electrique et Electronique

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de

Master

En Génie Industriel

Option : Productique

Présenté Par :

BENABBOU Sidi Mohammed – DJILALI Ahmed

THEME

Optimisation du placement des formes irrégulières
« **Nesting** »

Soutenu le : 28/06/2018

Devant le jury composé de :

Président : SARI Lamia	MCA	UABB Tlemcen
Encadrant : MALIKI Fouad	MCB	ESSA Tlemcen
Examineur : BENNEKROUF Mohammed	MCB	ESSA Tlemcen
Examineur : MKEDDER Mohammed El Amin	Ingénieur R&D	UABB Tlemcen

Année Universitaire : 2017/2018

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude à toute personne qui, de près ou de loin, a contribué à la réalisation de ce travail.

Nos remerciements s'adressent plus particulièrement à Mr MALIKI FOUAD qui a bien accepté de diriger ce mémoire. Ses remarques, ses précieux conseils et ses corrections nous ont été d'une grande utilité. Et, nous lui savons franchement gré pour ses permanents contacts. Nous lui disons « Merci ».

Nous aimerions témoigner notre gratitude aux professeurs : Mr BENNEKROUF Mohammed, Mr MKEDER, Mme SARI Lamia pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail.

Nous remercions les enseignants de la Faculté de Technologie et surtout de la filière GENIE INDUSTRIEL qui ont assuré notre formation universitaire depuis la première année.

Nous exprimons toute notre admiration à notre famille qui a supporté toute notre absence et leur patience mérite un hommage reconnaissant. Pour leur contribution matérielle et morale durant tout le parcours de nos études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donnée à la vie

Qui est sacrifiée à mon bonheur et ma réussite à ma mère

À mon père qui a été le mon ombre durant toutes les années

Des études qui veiller ma donner l'aide, à m'encourager que

Dieu les gardes et les protège

À mes frères

À mes très chers amis

À tous ce que j'aime

Ahmed

Je dédie ce mémoire

À mes chers parents ma mère et mon père, leurs soutiens et

Leur encouragement

À ma sœur

À mes grands-pères et mes Tantes

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du
secondaire*

Et du l'enseignement supérieur

Sidi Mohammed

Table des matières

Chapitre 1 : le placement dans l'industrie	1
1.Introduction.....	1
2. Types de problèmes de placement	3
2.1 Problème de stock de découpe	3
2.2 Problème de chargement.....	3
3. Propriétés matérielles :	4
3.1 Le placement dans l'industrie de la tôle.....	4
3.2 Le placement dans l'industrie textile :	5
3.3 Le placement dans l'industrie du cuir	5
4. Processus d'imbrication :	6
5. Planification (séquencement)	7
6. Processus de coupe :	7
7. Les différents types de découpe.....	8
8. Industries avec des problèmes de placement rectangulaires.....	9
8.1 Le placement de Bande (strip packing)	9
8.2 Le placement de bac (Bin packing).....	10
8.3 Disposition de la table non-guillotine	10
9.Conclusion	11
Chapitre 2 : le problème de placement.....	13
1.Introduction.....	13
2. Définitions générales.....	14
2.1 Définition des problèmes de placement	15
2.2 Vocabulaire des problèmes de placement.....	15
3. Les contraintes des problèmes de placement.....	15
3.1 Évaluation des contraintes de non-chevauchement et d'appartenance	16
4. Les problèmes de découpe et de conditionnement	16
4.1 Définition des problèmes de découpe et de conditionnement	17
4.2 Typologies des problèmes de découpe et de conditionnement	18
4.3 Problèmes de découpe.....	22
4.4 Problèmes de sac à dos	22
5. Le problème de bin packing à deux dimensions	23
5.1 Problème de découpe de formes irrégulières.....	25
5.2 Problèmes de conditionnement 3D d'objets de géométries quelconques.....	25
6. Les problèmes d'agencement	25

6.1 Problèmes d'agencement bidimensionnel.....	27
<i>Problèmes d'agencement tridimensionnel :</i>	27
7. Comparaison des problèmes C&P et des problèmes d'agencement.....	28
8. Conclusion	29
Chapitre 3 : problème avec des pièces irréguliers	31
Introduction.....	31
1. Revue de littérature	31
1.1 Définition du problème	32
2. Le modèle mathématique pour des différents forme irréguliers	33
3. Résolutions du problème en appliquant l'heuristique de JOSTLE pour les problèmes d'emballage bin-formes irréguliers avec rotation (2DBIPP).....	39
3.1 Description du problème.....	39
3.2 Procédure d'emballage	39
3.3 Algorithme de construction.....	41
3.4 Orientation de placement d'une pièce.....	44
3.5 Politique de placement	45
4. Le Logiciels de Nesting	48
4.1 Introduction.....	48
4.2 Notre logiciel (M2 GI-2018).....	48
4.3 Avantages et efficience	49
4.4 Paramètres de configuration de logiciel	50
Conclusion	52
Conclusion générale et perspectives	1
Références bibliographiques.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1:les étapes typiques impliquées dans le processus d'imbrication	2
Figure 2: Chargement d'une palette et un conteneur	4
Figure 3:Le nesting dans l'industrie de Tôle	4
Figure 4:Le nesting dans l'industrie de textile.....	5
Figure 5:Le nesting dans l'industrie de cuir.....	6
Figure 6:Le placement des pièces irrégulières selon un algorithme de nesting	6
Figure 7:Technique de coupe	7
Figure 8:Les différents types de découpe	8
Figure 9:les pièces imbriquées dans l'industrie de bois.....	9
Figure 10:L'emballage de bande dans l'industrie de papier.....	10
Figure 11 :Le placement en 3D	10

Chapitre 2

Figure 12:Présentation de quelques-uns des problèmes de découpe et de conditionnement.....	13
Figure 13: Présentation de quelques-uns des problèmes de découpe et de conditionnement.....	18
Figure 14 : Phénoménologie des problèmes de découpe et de conditionnement.....	20
Figure 15 : Classification des problèmes de découpe et de conditionnement	21
Figure 16: Exemple de problème d'emballage (2DBP).....	24
Figure 17: Exemple de problème d'emballage (2DBP).....	26

Chapitre 3

Figure 18:le point géométrique important basé par le modèle mathématique.....	33
Figure 19: les principaleux caractéristique d'un placement 2D.....	42
Figure 20: Remplissage de trous	43
Figure 21 Placement possible pour une nouvelle pièce.....	44
Figure 22:Placement de la pièce sur différents sommets le long du segment de placement réalisable.	46
Figure 23 : optimisation de la coque concave de la pièce (forme)	47
Figure 24:Le logiciel de Nesting M2 GI-2018.....	48
Figure 25 : L'interface d'imbrication de logiciel	50
Figure 26:Imbrication avec un espace entre les pièces	50
Figure 27 : Imbrication sans espace entre les pièces	51
Figure 28:L'utilisation de la zone concave d'autres pièces	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des problèmes C&P et des problèmes d'agencement	29
Tableau 2 : signification des variables et indices utiliser	32

Introduction générale

Les problèmes de placement regroupent une large gamme de problèmes, à savoir les problèmes de découpe et de conditionnement et les problèmes d'agencement. Les traductions anglophones de ces termes sont respectivement *Cutting & Packing problems* (C&P) et *Layout problems*.

Ces problèmes ont fait l'objet de nombreuses études dans la littérature et ont généré une grande quantité de publications. Les raisons à cela sont multiples. Tout d'abord, il existe de nombreuses variantes à ces problèmes, qui peuvent générer des modélisations et des méthodes de résolution différentes. Ensuite, les objectifs et contraintes peuvent varier, nécessitant des adaptations, voire des refontes complètes des modèles. Récemment, l'apparition des méthodes de résolution multi-objectif a ouvert de nouvelles perspectives permettant la prise en compte de nouveaux aspects.

Enfin, les enjeux industriels derrière toutes ces problématiques sont importants, entraînant une recherche perpétuelle sur ces sujets connus depuis de nombreuses années. Les enjeux industriels financiers ont été les moteurs initiaux de cette recherche. Récemment, les enjeux environnementaux ont apporté une raison supplémentaire à l'intérêt scientifique porté à ces problèmes. La recherche s'inscrit désormais dans une démarche de développement durable.

Objectif

Modélisation d'un system de placement qui concerne des pièces de formes irrégulières Par une heuristique bien défini qui s'adapte à ce type de problème. Notre mémoire est divisée en trois chapitres

Chapitre 1 : un aperçu sur le monde de NESTING débutant par l'historique de ce problème, les chercheurs qui ont travaillé sur ce sujet et voir comment ces derniers ont réagi avec la complexité du problème.

Chapitre 2 : présenter les applications industrielles lies à la thématique du NESTING.

Chapitre 3 : Un algorithme de placement doit être en mesure de fournir le placement d'un sous ensemble de ces formes. Il cherche à optimiser une fonction objective visant à minimiser les pertes de matière.

Chapitre 1 : le placement dans l'industrie

1.Introduction

La réduction des coûts de production est l'un des problèmes majeurs dans les industries manufacturières dans un monde de plus en plus concurrentiel où les produits sont disponibles presque instantanément partout dans le monde. La forte utilisation des matériaux présente un intérêt particulier pour les industries de production de masse, car de petites améliorations de la disposition peuvent entraîner des économies importantes de matériau et réduire considérablement les coûts de production. Des problèmes de découpe et d'emballage sont rencontrés dans de nombreuses industries. La complexité du problème et l'approche de la solution dépendent de la géométrie des éléments à placer et des contraintes imposées. Alors que l'industrie **du bois, du verre et du papier** est principalement concernée par la coupe de figures régulières, des objets de forme irrégulière et arbitraire doivent être emballés dans l'industrie de **la construction navale, du textile et du cuir**. La durée de la génération de mise en page est également pertinente dans les applications industrielles. Comme la génération manuelle peut facilement nécessiter plusieurs jours-hommes, le temps d'emballage est un facteur économique important. Il est donc compréhensible que les industries cherchent des moyens d'automatiser le processus d'emballage. Le schéma ci-dessous résume les étapes généralement impliquées dans le processus de Nesting industrielle. [15].

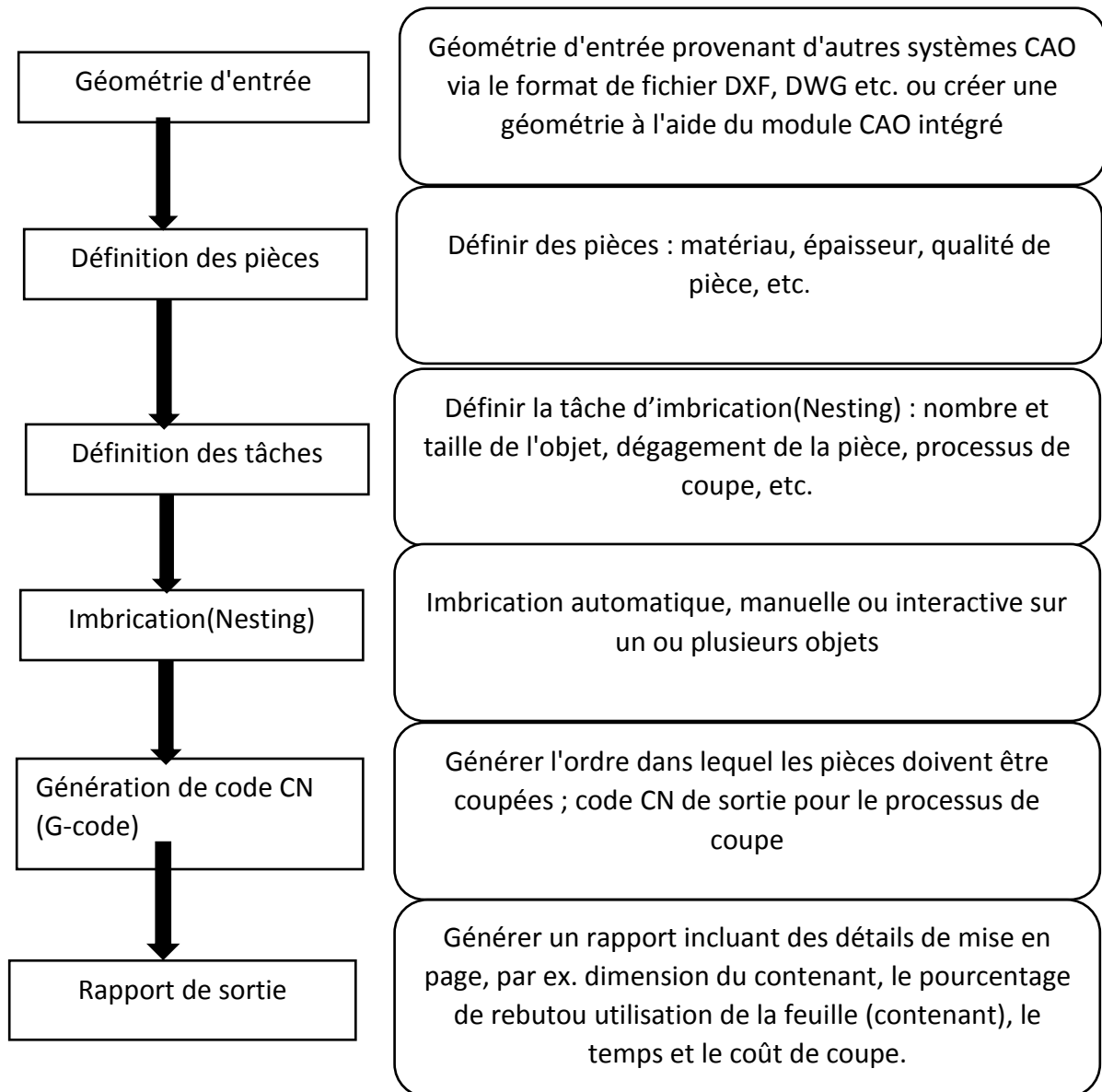


Figure 1: les étapes typiques impliquées dans le processus d'imbrication

2. Types de problèmes de placement

Les problèmes d'emballage (placement) se produisent dans divers domaines d'application impliquant des contraintes et des objectifs différents. Dans la suite, certains des problèmes les plus importants sont brièvement définis. Des problèmes industriels plus importants peuvent également apparaître en tant que combinaisons de deux ou plusieurs de ces types de base. [15].

2.1 Problème de stock de découpe

Le problème de stock de découpe concerne la découpe de pièces (composants) d'une liste de commande donnée à partir d'un ensemble de feuilles de stock (contenants). Ce problème peut être scindé en deux sous-problèmes, *un problème d'assortiment* (détermination des feuilles à garder en stock) et *un problème de perte de finition* (détermination d'algorithme de coupe pour minimiser le gaspillage).

Problème de perte de finition :

Le problème de perte de finition concerne l'allocation de la liste de commande sur les feuilles de stock données. La liste de commandes décrit l'ensemble des pièces qui doivent être placées. L'objectif est de minimiser le coût total des feuilles de stock nécessaires pour exécuter la commande.

Problème d'assortiment :

Ce problème implique la détermination des tailles de stock nécessaires pour remplir la liste de commandes. La liste de commande doit être affectée à une fourniture de feuilles de stock de sorte que la meilleure sélection de feuilles soit utilisée.

2.2 Problème de chargement

Le problème de chargement décrit le processus d'ajustement d'un nombre maximum de boîtes sur une palette ou dans un conteneur. Le problème de chargement des palettes peut être considéré du point de vue du fabricant, où des boîtes identiques doivent être chargées sur une palette (problème de chargement des palettes du fabricant), ainsi que du côté du distributeur où la palette doit être emballée avec des articles non identiques (problème de chargement des palettes du distributeur). Le chargement des conteneurs est similaire au chargement des palettes, bien que dans les applications pratiques, les deux variantes du problème de chargement puissent être distinguées par leurs contraintes.

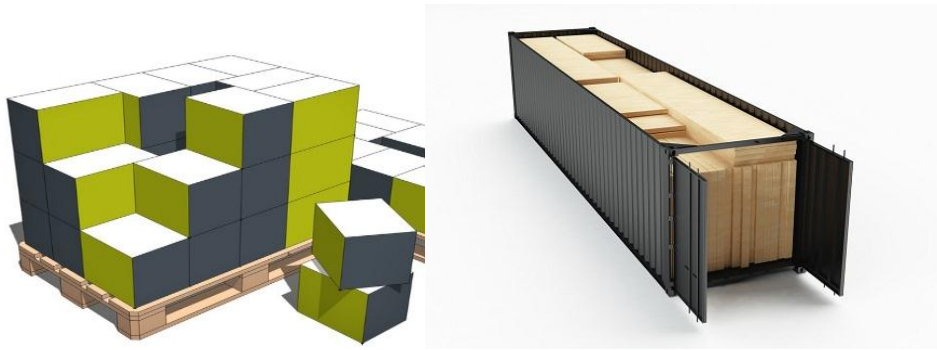


Figure 2: Chargement d'une palette et un conteneur

3. Propriétés matérielles :

Les matières premières sont soit disponibles sous la forme de matériau en feuille avec des dimensions fixes ou en tant que matériau enroulé avec une largeur fixe. Cela a un impact sur l'objectif de la tâche d'imbrication. Dans le premier cas, la forme d'un reste possible décide s'il peut être utilisé dans une future tâche d'imbrication ou doit être traité comme du gaspillage. Pour les matériaux enroulés, cela n'est généralement pas une contrainte.

Comme les matériaux ont des propriétés inhomogènes telles que l'orientation des grains, le nombre d'orientations possibles dans lesquelles les pièces peuvent être emboîtées peut-être limiter. Cela dépend entièrement de l'application et du traitement ultérieur des formes. S'il n'y a pas d'opérations de pliage à suivre, les pièces peuvent être tournées dans n'importe quelle direction, sinon un angle spécifié par rapport à l'orientation du grain doit être appliqué. [15]

3.1 Le placement dans l'industrie de la tôle

L'industrie des tôles doit faire face à des problèmes de nesting réguliers et irréguliers. Certaines contraintes concernant les propriétés du matériau, le processus de coupe et les aspects de planification distinguent la tâche de nesting dans ce domaine par d'autres industries. En plus de réduire le gaspillage au minimum, il existe un certain nombre d'autres facteurs qui décident de la disposition finale des pièces. [16].

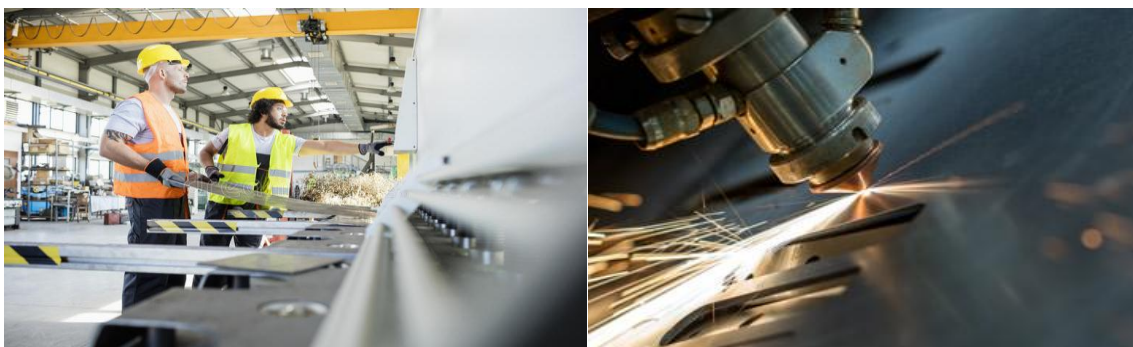


Figure 3: Le nesting dans l'industrie de Tôle

3.2 Le placement dans l'industrie textile :

L'industrie textile utilise habituellement un matériau enroulé et est donc principalement concernée par le problème de l'emballage des bandes.

Les propriétés du matériau limitent la génération de disposition. Comme le tissu a souvent certaines propriétés directionnelles et un motif, l'orientation des pièces est généralement limitée à des intervalles de rotation de 0° et 180° . Dans de nombreux cas, il peut ne pas être possible de refléter les pièces car le tissu a des propriétés différentes de l'autre côté. [16].



Figure 4: Le nesting dans l'industrie de textile

3.3 Le placement dans l'industrie du cuir

La tâche de Nesting dans l'industrie du cuir est très complexe car les pièces à imbriquer ainsi que les objets, les peaux, sont très irréguliers. Comme le cuir est un matériau naturel, par opposition aux matériaux manufacturés utilisés dans l'industrie du textile et de la tôle, les peaux sont constituées de zones ayant diverses qualités. La différence de qualité peut être due à des défauts et des différences de couleur.

Le processus d'imbrication doit donc faire correspondre les parties avec leurs zones de qualité respectives sur la peau. Habituellement, **le traitement d'image** a lieu avant le processus d'imbrication pour déterminer **la forme et la qualité des peaux**. Comme cette tâche d'imbrication est très complexe et doit tenir compte de nombreuses exigences spécifiques, des emballages d'imbrication spécialement conçus sont disponibles pour l'industrie du cuir.



Figure 5: Le nesting dans l'industrie de cuir

4. Processus d'imbrication :

Les parties à imbriquer peuvent contenir des zones vides, dont certaines peuvent être suffisamment grandes pour être prises en compte pour l'imbrication d'éléments plus petits. Cette technique est appelée emboîtement dans le trou et est très commune dans l'industrie de la construction navale.

Pour réduire le gaspillage, l'algorithme d'imbrication doit être capable de suivre et d'imbriquer dans des zones vides de **formes irrégulières**. Parfois, la tâche d'imbrication actuelle ne contient pas un nombre suffisant de formes relativement petites. Comme la matière première est souvent trop précieuse pour être gaspillée, certaines pièces de remplissage peuvent être désignées et utilisées à la place. Ceux-ci ne font pas partie de la commande en cours et peuvent donc ne pas être requis immédiatement, mais sont produits pour le stock.

Les tâches d'imbrication plus importantes peuvent impliquer des matériaux de types différents, par ex. épaisseur. Dans l'industrie de la construction navale, des feuilles d'épaisseurs différentes peuvent être impliquées dans le processus d'imbrication. Alors qu'un certain nombre de pièces nécessitent un certain type de feuille, souvent plusieurs épaisseurs conviennent pour une sous-section de la liste de commande.

Par conséquent, en fonction de la disponibilité, l'algorithme d'imbrication doit décider de la meilleure allocation (placement).

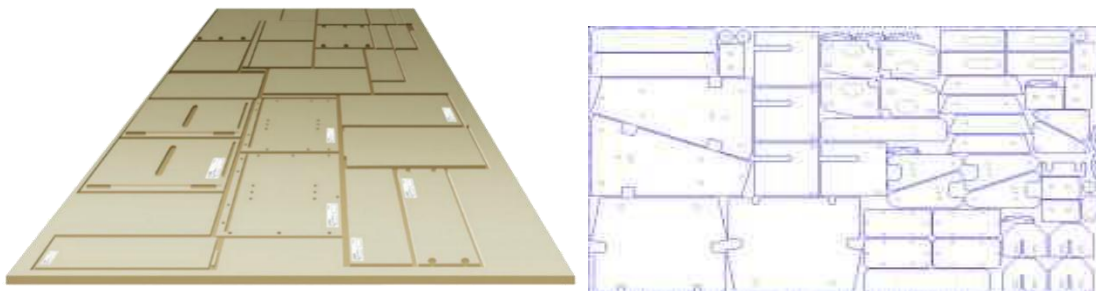


Figure 6: Le placement des pièces irrégulières selon un algorithme de nesting

5. Planification (séquencement)

La séquence dans laquelle les pièces sont coupées peut être importante pour le processus de fabrication ultérieur. C'est le cas lorsque les pièces doivent être traitées dans différentes étapes. Si les dispositions sont grandes, une allocation spéciale des composants (pièces) par rapport aux feuilles facilite cela. La séquence des pièces peut également être importante pour l'emballage et l'expédition. Des contraintes géométriques ou de poids peuvent exiger que les pièces soient emballées dans un certain ordre. Parfois, des listes de commandes différentes sont imbriquées dans un contenant (feuille) afin de maximiser l'utilisation du matériel. D'où la séquence d'ordre des pièces joue également un rôle dans l'expédition.

6. Processus de coupe :

La technique de coupe utilisée pour obtenir les pièces à un grand impact sur la génération de la mise en page. En fonction de la technologie de découpe (découpe laser et plasma, estampage, par exemple), une distance minimale entre les pièces est requise.

Ce paramètre est appelé **largeur de pont**. En découpe laser et plasma, le procédé fonctionne avec une certaine largeur. Afin de ne pas endommager les pièces, une certaine distance entre les formes voisines est nécessaire. Dans les processus d'estampage, le matériau a tendance à glisser sur les arêtes de coupe si la largeur du pont est trop petite. Un autre paramètre important qui détermine le processus de coupe est la longueur de coupe. Les contenants (feuilles) peuvent être optimisés pour que la découpe de toutes les pièces puisse être réalisée en minimisant la distance totale. [15].



Figure 7: Technique de coupe

7. Les différents types de découpe

En pratique, les utilisateurs sont souvent contraints par le matériel de découpe disponible, i.e. la façon de procéder pour la réalisation d'un plan de découpe est déferente. [17]

La découpe guillotine :

Si on suppose que le support est une plaque rectangulaire, alors la découpe est effectuée par la dissection en allant d'un côté a son apposé parallèlement aux deux autres.

La découpe non guillotine :

En générale cette découpe engendre une solution meilleure que celle réalisée par les découpes du type guillotine, en effet cette découpe consiste à utiliser le même procède que dans la découpe

Guillotine, et de plus, elle peut être effectuée tout en marquant des arrêts d'atteindre le côté opposé du (sous) rectangle à découper.

La découpe non orthogonale :

Cette découpe ne prend pas en considération l'orientation des pièces. Cette fois les pièces peuvent être pivotées et translattées (on exécute des rotations sur les pièces, donc elles ne sont pas fixées).

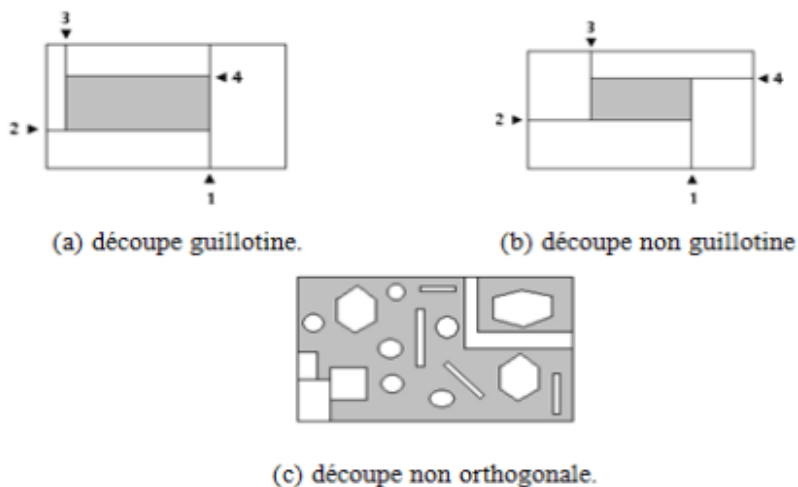


Figure 8: Les différents types de découpe

8. Industries avec des problèmes de placement rectangulaires

Le groupe des problèmes d'emballage rectangulaires apparaît dans l'industrie du papier, du bois et du verre. La technique de coupe, qui implique des coupes de cisaillement, impose une contrainte caractéristique sur les aménagements dans cette zone. Les motifs d'emballage doivent être guillotine, de sorte que les pièces puissent être obtenues par coupe droite à travers la disposition restante seulement.

Emballage dans l'industrie du verre et du bois doit également tenir compte de diverses gammes de qualité et des défauts de la matière première. Des tâches d'emballage rectangulaires peuvent se produire en tant que problèmes d'emballage de bande et de bac. [15].



Figure 9: les pièces imbriquées dans l'industrie de bois

8.1 Le placement de Bande (strip packing)

L'industrie du papier est principalement concernée par le problème de l'emballage des bandes, car la matière première est disponible sous forme de rouleaux. D'où le processus d'emballage vise à réduire la hauteur de contenant.



Figure 10: L'emballage de bande dans l'industrie de papier

8.2 Le placement de bac (Bin packing)

Le placement des bacs fait référence à l'emballage de plusieurs bacs et peut être trouvé lorsque le matériau de base (contenant) est disponible sous forme de feuilles plutôt que de rouleaux. Le placement de la bande n'est pas limité au boîtier rectangulaire. Dans les applications industrielles, ce problème est appelé découpe de stock, par exemple dans l'industrie du verre, du bois et des métaux.

L'objectif est généralement de trouver l'ensemble des feuilles pour accommoder toutes les parties de la liste de commande en minimisant le total des matériaux utilisés. Selon l'application, les feuilles peuvent être identiques ou avoir des dimensions différentes. L'emballage régulier des bacs est fréquent en **trois dimensions**, notamment les problèmes de chargement des conteneurs et des palettes.



Figure 11 : Le placement en 3D

8.3 Disposition de la table non-guillotine

Les applications industrielles impliquant des dispositions non-guillotine sont moins fréquentes. Le problème de découpe de stock 2D se présente comme un problème partiel dans le chargement des palettes et des conteneurs. Une approche couramment adoptée

consiste à réduire le problème 3D à deux dimensions. Une fois qu'un ensemble de boîtes a été déterminé pour une certaine couche, **la couche** représente un problème d'emballage 2D non-guillotine.

Le problème de l'emballage rectangulaire peut se produire sous la forme non- guillotine lorsque différentes méthodes de coupe telles que le découpage au laser et au plasma sont utilisées pour obtenir les pièces.

9.Conclusion

Dans ce chapitre pour continuer notre concept, nous avons expliqué l'importance de nesting dans le monde industriel et les différentes contraintes existe que ce soit dans le placement ou le découpe(C&P) et on a cité quelque domaine d'application de Nesting dans le monde Industriel, tout cela pour donner une idée de la nécessité de résolution de ce type des problèmes dans le monde concurrentiel.

Chapitre 2 : le problème de placement

1.Introduction

La fabrication d'un objet est souvent conduite avec l'objectif d'une réduction du coût de revient à travers la réduction de la consommation en matière. Cette tendance est en particulier liée aux augmentations de prix des matières premières.

Aussi, en général, l'**exploitation optimale des ressources** constitue une préoccupation croissante dans les industries manufacturières.

Une formulation industrielle du problème de découpe en deux dimensions peut se présenter comme suit : « *Étant donné une matière première présentée sous forme de plusieurs unités de dimensions et formes éventuellement différentes, comment produire une quantité de pièces, en fonction de la demande et des niveaux de stocks, en utilisant le minimum de matière, et ce dans un temps compatible avec les délais fixés par le client.* »

La quantité de pièces à produire peut-être connue ou non à l'avance. Si l'objectif principal consiste à minimiser la consommation en matière première, il est d'actualité de produire vite pour satisfaire des délais de livraison impératifs et de plus en plus courts, au « juste-à-temps » pour éviter les frais de stockage.

Une demande établie à partir d'une liste de pièces et d'une certaine quantité de matière première constitue la donnée initiale du processus. Les contraintes sont définies comme étant les + imposées au processus pour tenir compte des propriétés de la matière, de la qualité des pièces, du mode de découpe, de l'état des stocks, etc.

La figure 1 présente quelques-uns des problèmes de découpe et de conditionnement de découpe de matières premières (tôles, tissus, ...) permet de limiter les coûts de découpe ainsi que les chutes générées pour la production de biens manufacturés. L'optimisation de chargement d'un camion, navire, ou avion permet de maximiser le chargement. De plus, la répartition optimale du chargement permet une usure régulière des pièces mécaniques et des consommables. L'agencement optimal d'un assemblage de composants électroniques permet de limiter son échauffement ainsi que sa consommation électrique. Dans les usines, une disposition optimale des moyens de production permet d'augmenter la productivité, de limiter les flux et les coûts de déplacement.

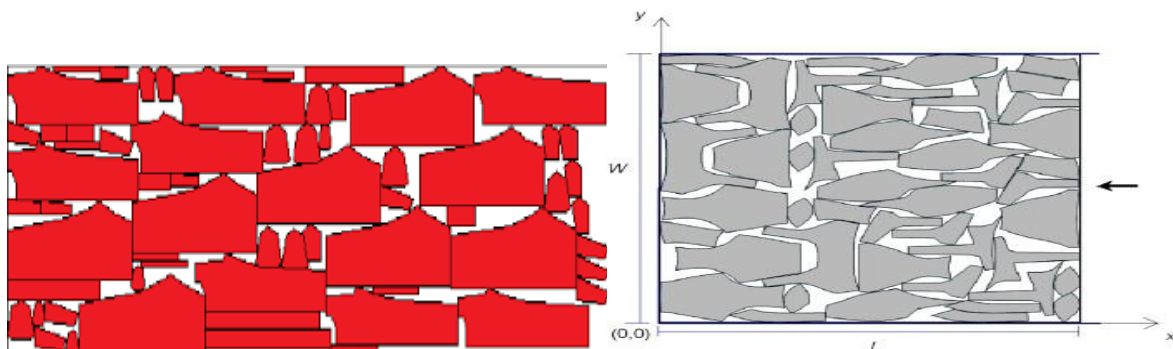


Figure 12:Présentation de quelques-uns des problèmes de découpe et de conditionnement.

2. Définitions générales

Avant de définir mathématiquement les problèmes de placement en détail, les différents éléments les constituant doivent être définis, à savoir composants, attributs, variables et objectifs et contraintes. Généralement, un composant est défini comme un élément à positionner caractérisé par une liste d'attributs. Dans le cadre de notre travail, les composants sont le plus souvent des objets physiques. Dans la littérature, certains auteurs considèrent aussi des objets abstraits, présentant une analogie directe avec les problèmes de placement [1].

Les attributs expriment les propriétés des composants, ils sont utilisés pour évaluer les solutions de placement. Ils peuvent être constants ou variables. Dans la majorité des problèmes rencontrés, ce sont des données qui ne changent pas lors de la résolution. Les composants sont entièrement définis par leur géométrie et leurs attributs. La géométrie d'un composant peut être simplement une longueur pour un problème 1D, ou bien un modèle CAO complet pour les problèmes 3D.

Un contenant est un élément physique défini avec plusieurs attributs, dans lequel l'ensemble des composants doit être positionné. Le contenant peut être de dimensions fixes ou variables. Dans ce dernier cas, l'objectif du problème consiste à minimiser les dimensions du contenant, comme dans un problème de découpe. On peut aussi rencontrer des cas où le contenant sert de support aux composants à positionner. C'est le cas par exemple dans le problème d'agencement des composants d'un camion, où ces composants doivent être placés sur le châssis [2].

Enfin, le problème peut présenter plusieurs contenants. Cette situation peut soit signifier qu'il faut identifier le contenant où placer chaque composant, soit qu'il faut trouver le nombre minimum de contenants pouvant accueillir les composants. Les inconnues du problème sont les variables de positionnement, ainsi que certains attributs des composants.

Chaque problème de placement présente au moins des contraintes de non-chevauchement entre composants et, dans la plupart des cas, des contraintes d'appartenance au contenant. Ces contraintes définissent les contraintes de placement du problème. Des contraintes additionnelles de positionnement peuvent être considérées dans les problèmes d'agencement. Les objectifs d'un problème sont ses critères d'évaluation. Ils sont exprimés comme des quantités numériques utilisées pour classer les différentes solutions proposées. Les objectifs sont des fonctions mathématiques explicites ou des résultats numériques définis par le concepteur. C'est le cas lorsque les critères ne peuvent être modélisés explicitement par des fonctions mathématiques.

2.1 Définition des problèmes de placement

Les définitions des différents éléments d'un problème de placement permettent de définir ce dernier : ***Étant donné un ensemble de composants ainsi qu'un ensemble de contenants, un problème de placement consiste à trouver l'ensemble des variables de positionnement des composants afin de minimiser un ensemble d'objectifs, tout en respectant des contraintes. Dans tous les cas, les contraintes incluent les contraintes de placement.***

Un placement ou une solution peut être vu comme une affectation de l'ensemble des variables de positionnement ainsi que des attributs. Une solution réalisable ou admissible est une affectation de toutes les variables, telle que l'ensemble des contraintes de placement soit satisfait. Une solution réalisable sera dite efficace si aucune autre solution n'est meilleure. Résoudre un problème de placement, c'est proposer une ou plusieurs solutions efficaces.

2.2 Vocabulaire des problèmes de placement

Dans la littérature, plusieurs mots ou expressions sont utilisés pour désigner la même chose ou bien un même mot peut désigner différentes choses. Le mot *placement* a été utilisé plusieurs fois dans la littérature :

Wäscheret al. [3] utilisent ce terme pour définir une catégorie de problèmes, pour laquelle une série de composants faiblement hétérogène doit être affectée à un ensemble fini de contenants. Dans ce travail ainsi que dans de nombreux travaux, le mot *placement* fait référence à une solution. Les différents éléments d'un problème de placement ont été utilisés dans différents contextes dans la littérature. Par exemple, **Zhang et al.** [4] utilisent le terme *objet* pour désigner un composant à placer à l'intérieur d'un satellite, alors que les *objets* font référence au contenant dans la typologie C&P de **Dyckhoff**. [1] Dans les problèmes de *bin packing*, les termes objets, items ou encore pièces sont utilisés pour désigner les composants. Dans les problèmes d'intégration à grande échelle, le terme module désigne un composant rectangulaire [5].

3. Les contraintes des problèmes de placement

Pour tous les problèmes d'optimisation, les contraintes permettent d'identifier les solutions réalisables et irréalisables. Pour les problèmes de placement, trois types de contraintes peuvent être identifiées :

- celles qui consistent à bloquer certains degrés de liberté des composants.
- celles qui s'expriment comme une combinaison de plusieurs paramètres d'optimisation.
- celles qui sont une combinaison d'objectifs.

Naturellement, les premières sont les plus simples à satisfaire. De plus, ces restrictions réduisent le nombre de degrés de libertés et par conséquent l'espace de recherche. Les secondes peuvent être vérifiées avant d'évaluer les objectifs. Enfin, les contraintes du

troisième type nécessitent d'évaluer les objectifs pour savoir si les contraintes sont satisfaites.

Les contraintes de non-chevauchement entre composants ainsi que les contraintes d'appartenance des composants au contenant définissent les contraintes communes à tous les problèmes de placement.

Quelques autres contraintes classiques que l'on peut rencontrer dans les problèmes d'agencement sont listées ci-après :

- contraintes de position ou d'orientation.
- contraintes de proximité.
- contraintes de restriction de domaine.

Plusieurs contraintes qui expriment des relations explicites entre les composants et le contenant doivent être prises en compte lors de la modélisation du problème. Cela permet de garantir leurs respects.

3.1 Évaluation des contraintes de non-chevauchement et d'appartenance

Dans les problèmes de placement 2D et 3D, les calculs de chevauchement et d'appartenance peuvent être très coûteux et représenter la majorité du temps de calcul. Pour un problème avec m composants, $(m^2/2 + m/2)$ tests sont nécessaires pour détecter le chevauchement et l'appartenance.

L'idéal consiste à utiliser une méthode de placement légal, où les contraintes de non-chevauchement sont automatiquement satisfaites. Elle doit tout de même s'assurer que tous les composants ont pu être placés. Dans le cas où une telle méthode ne peut être utilisée, il faut s'assurer que chaque composant est bien à l'intérieur du contenant et qu'aucune paire de composants ne se chevauche. Ces tests peuvent être effectués de différentes manières en fonction de la représentation géométrique choisie. Les problèmes avec des géométries régulières (rectangles, cercles, sphères, ...) peuvent utiliser des formulations analytiques pour évaluer les contraintes. En revanche, lorsque la géométrie des composants devient complexe, différentes stratégies ont été développées : en 2D, des outils géométriques comme les polygones de non-recouvrement peuvent être utilisés pour détecter le chevauchement entre composants à moindre coût. En 3D, les géométries sont généralement approchées pour permettre une détection rapide des collisions. Parmi toutes les approximations géométriques possibles, les représentations sous formes de *voxels* (contraction anglophone de *volumetric pixels*), d'*octree* (contraction anglophone d'octant *tree*) permettent de détecter facilement les collisions entre composants.

4. Les problèmes de découpe et de conditionnement

Les problèmes de découpe et de conditionnement (***Cutting and Packing problems***), forment une famille de problèmes à part entière. Dans la littérature française, l'expression *découpe et empaquetage* est aussi employé. Ils sont abrégés par la suite C&P.

Ce sont des problèmes dont les formulations verbale et mathématique sont simples, mais pour lesquels la combinatoire rend ces problèmes difficiles à résoudre. Les premiers travaux

remontent à plus de quarante ans. Depuis, plusieurs classifications de ces problèmes ont été entreprises [1], [3].

4.1 Définition des problèmes de découpe et de conditionnement

Les problèmes de découpe et de conditionnement sont des problèmes de placement, pour lesquels les composants sont uniquement géométriquement reliés entre eux. En d'autres termes, il n'y a aucune interaction explicite entre les composants. Tous les composants présentent les mêmes types d'attributs. Objectifs et contraintes peuvent toujours être modélisés comme des fonctions mathématiques et sont définis globalement, c'est-à-dire qu'ils impliquent l'ensemble des attributs des composants.

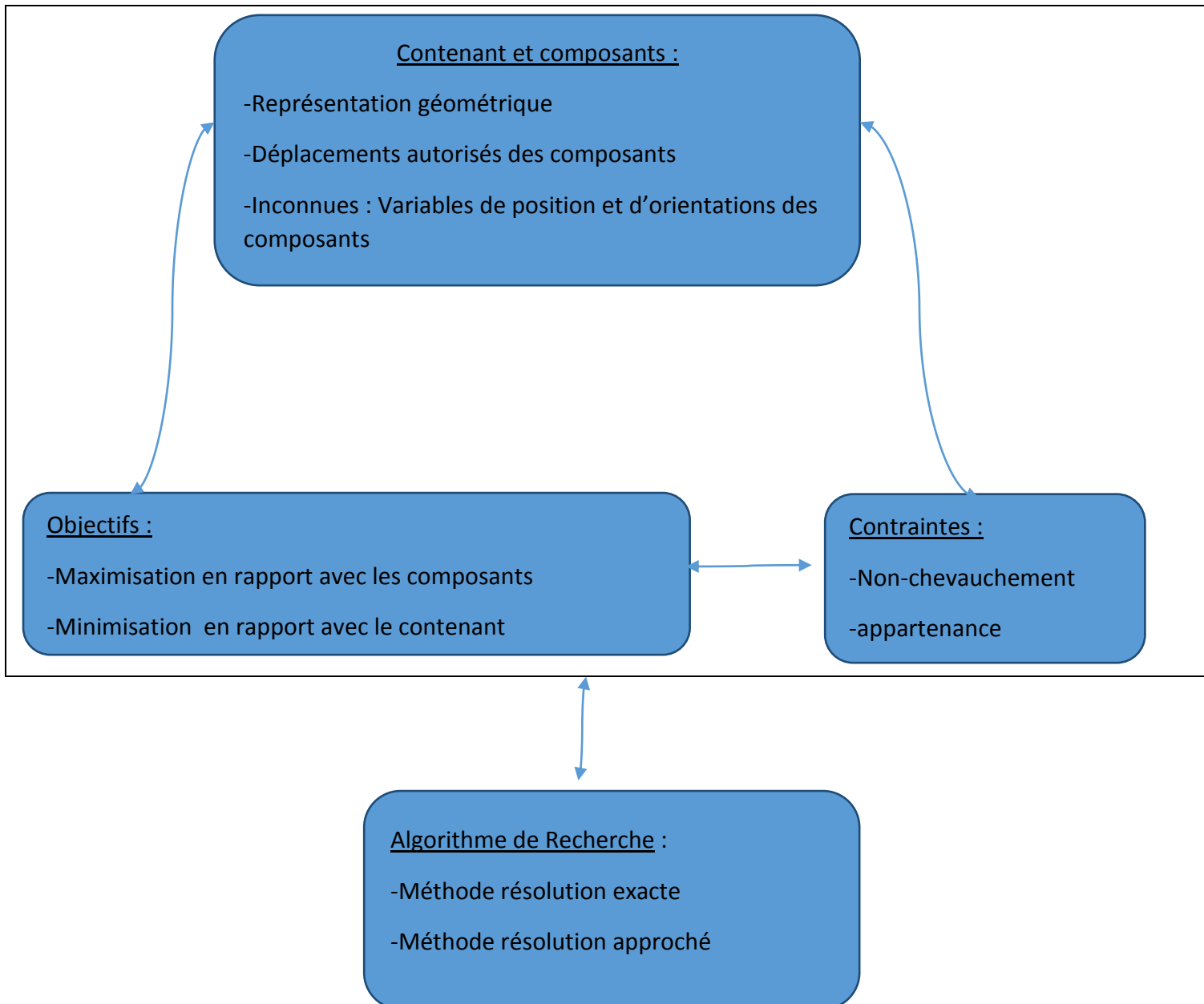


Figure 13: Présentation de quelques-uns des problèmes de découpe et de conditionnement

Les problèmes C&P englobent une large variété de problèmes qui ont tous été étudiés depuis plusieurs années. En 2007, **Wäscher et al.** [3] ont identifié plus de 400 articles traitant de ces problèmes. Ces problèmes sont bien connus et plusieurs typologies ont été développées pour classer ces problèmes, rendant leurs identifications plus faciles.

Les problèmes C&P peuvent être décomposés en deux types de problèmes, les problèmes de décision et les problèmes de minimisation / maximisation. *Un problème de décision est un problème pour lequel la réponse est binaire : oui ou non, par exemple, est-il possible de placer l'ensemble de ces composants à l'intérieur de ce contenant ?* Ces problèmes sont des problèmes NP -complets [6]. NP est l'abréviation de '*Non-déterministe polynomial*'. Cela signifie que les solutions associées au problème de décision correspondant peuvent être vérifiées à l'aide d'un algorithme polynomial.

Le second type de problème implique une réponse numérique : *combien de ces composants peut-on placer à l'intérieur de ce contenant ?* Les problèmes de décision sont généralement utilisés pour résoudre les problèmes C&P de minimisation / maximisation. Un exemple classique de cette situation se retrouve dans les problèmes de découpe de formes irrégulières, où l'on résout successivement une suite de problèmes de décision. La plupart de ces problèmes sont NP-difficiles [6].

Il peut être aussi noté que la plupart des problèmes C&P sont mono-objectifs, spécificité qui a été exploitée pour construire les différentes typologies.

Les problèmes multi-objectifs de cette catégorie impliquent plusieurs fois le même type d'objectifs, comme par exemple pour le problème de sac à dos multi-objectif. Par conséquent, les problèmes C&P multi-objectifs peuvent être rangés dans les différentes typologies développées pour les problèmes mono-objectifs. Les problèmes C&P représentent une branche des problèmes de placement, pour lesquels une formulation est facile à obtenir, mais nécessitent des méthodes de résolution efficaces pour obtenir des solutions optimales ou quasi-optimales. Les sections suivantes présentent les différentes typologies de la littérature proposées ainsi que les différents problèmes C&P.

4.2 Typologies des problèmes de découpe et de conditionnement

Dyckhoff. [1] a été le premier à proposer une typologie des problèmes de découpe et de conditionnement. Cette typologie est basée sur quatre paramètres qui permettent d'identifier 96 problèmes. Le premier paramètre sert à identifier la dimension du problème. Le second renseigne sur le type d'affectation, à savoir si tous les composants doivent être placés à l'intérieur du ou des contenants ou si seulement une sélection de ces composants doit être positionnée. Dans le premier cas, le problème est une minimisation effectuée sur les contenants (taille ou nombre). Dans le second cas, il s'agit d'une maximisation effectuée sur les composants à positionner. Concrètement, il s'agit de maximiser l'espace d'utilisation ou une fonction profit en sélectionnant un sous-ensemble des composants. Le troisième paramètre fournit des indications sur le type de contenant. Enfin le quatrième paramètre

contient des informations sur la nature des composants, à savoir s'ils sont identiques, faiblement différents ou fortement différents. La redondance de certains problèmes, le manque de reconnaissance internationale ont poussé **Wäscher et al.** [3] à améliorer cette typologie. Entre temps, [7] ainsi que **Dowland et al.** [8] ont proposé un tour d'horizon des problèmes de découpe et de conditionnement. **Dyckhoff et al.** ont proposé une bibliographie annotée en 1997 [9].

1. Dimension du problème

- a- Problème unidimensionnel
- b- Problème bidimensionnel
- c- Problème tridimensionnel
- N** Problème multidimensionnel avec $N > 3$

2. Type d'affectation

- B** Tous les contenants et une sélection des composants
- V** Une sélection des contenants et tous les composants

3. Nature des contenants

- O** Un seul contenant
- I** Plusieurs contenants identiques
- D** Plusieurs contenants différents

4. Nature des composants

- F** Quelques composants
- M** De nombreux composants très différents entre eux
- R** De nombreux composants assez similaires entre eux
- C** Composants identiques

La figure 3 présente le découpage des problèmes C&P effectué par **Dyckhoff** [1]. Il montre que ces problèmes touchent aussi bien les domaines de l'industrie de la découpe que les systèmes de production. La figure 4 présente la classification de **Wäscher et al.** [3] des problèmes C&P classiques. Cette classification est orientée sur l'objectif du problème, à savoir une maximisation sur les composants ou une minimisation à effectuer sur le contenant. Les deuxième et troisième critères concernent la géométrie du contenant et des composants. À partir de ces trois critères, plusieurs problèmes types sont établis. Chacun de ces problèmes peut être raffiné en fonction des spécificités de chaque problème.

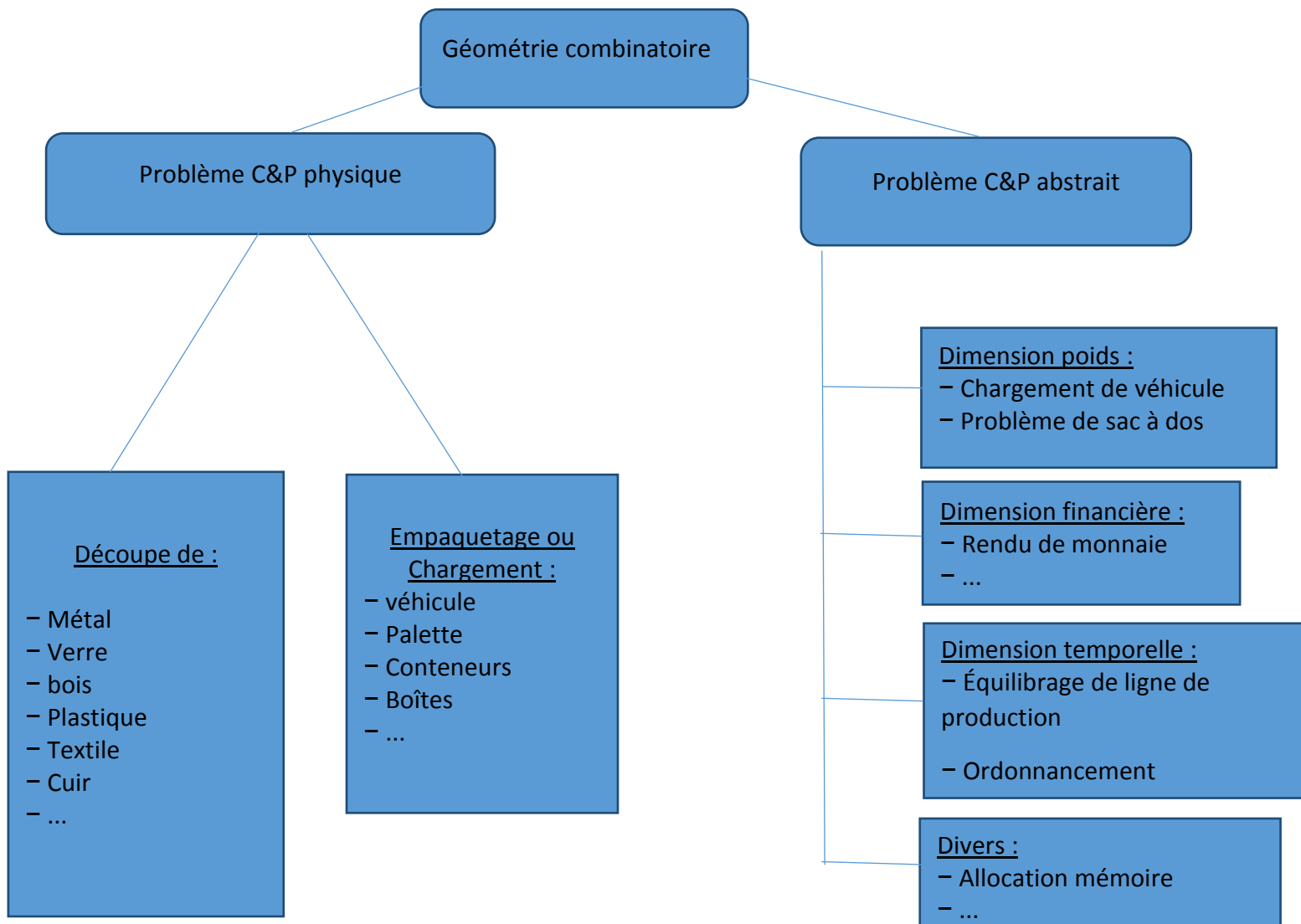


Figure 14 : Phénoménologie des problèmes de découpe et de conditionnement

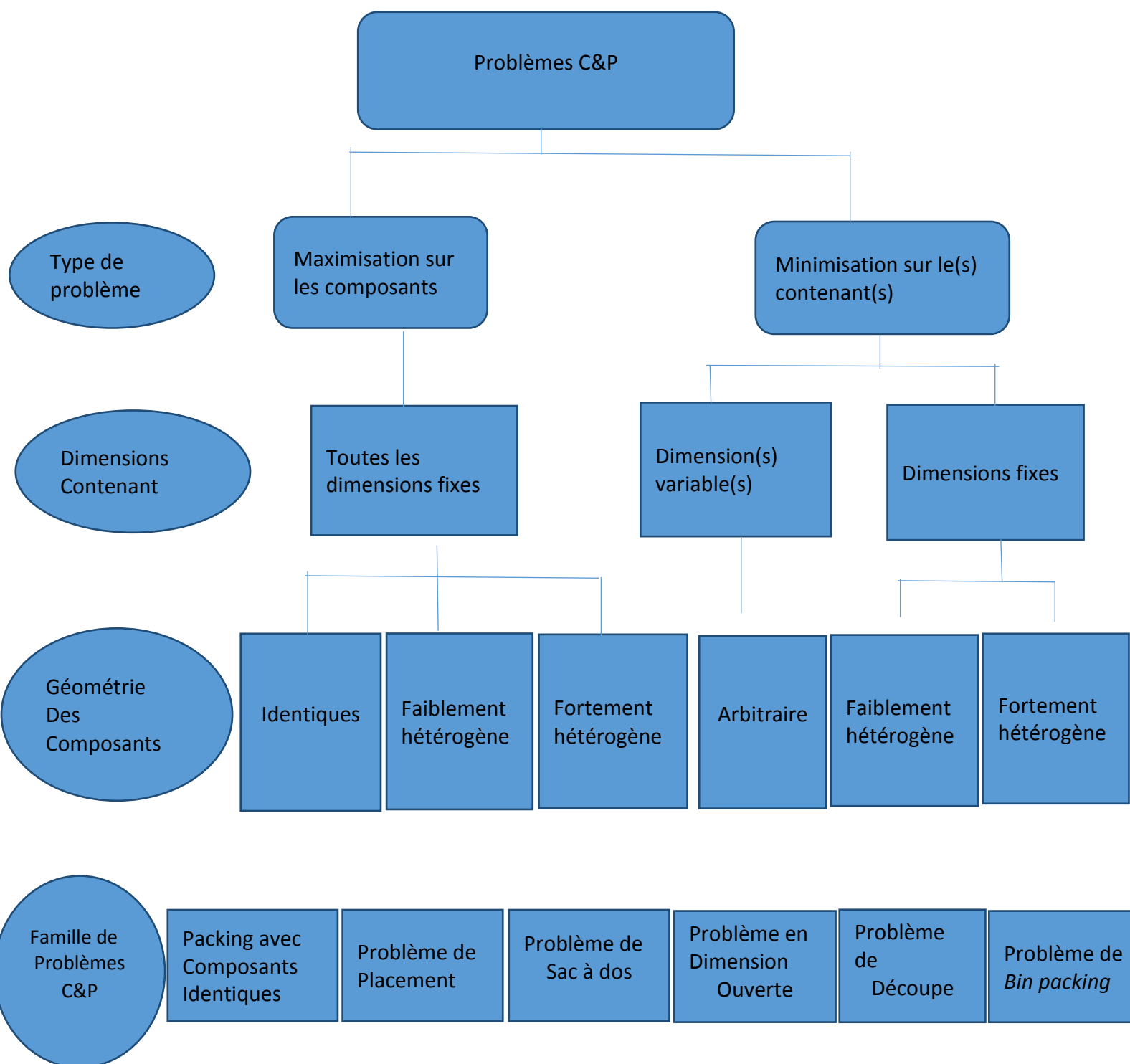


Figure 15 : Classification des problèmes de découpe et de conditionnement

4.3 Problèmes de découpe

Les problèmes de découpe trouvent de nombreuses applications dans l'industrie, et présentent un intérêt économique certain.

Problème de découpe unidimensionnelle :

Classiquement, le problème de découpe unidimensionnelle (*1D cutting stock problem*) consiste à trouver le nombre minimal de contenants de dimensions identiques pouvant contenir un ensemble donné de composants. Les contenants peuvent être vus comme des stocks dans lesquels différents éléments (composants) doivent être découpés. La différence entre le problème de *bin packing* et de découpe réside dans la variété des composants à placer ou à découper. Pour le problème de *bin packing*, les composants ont des longueurs variées, alors que pour le problème de découpe, les composants sont relativement identiques. Cette différence entraîne des modifications de la formulation et de la résolution du problème. Le problème est formulé comme un problème de programmation linéaire en nombres entiers et est généralement résolu avec une méthode de génération de colonnes [10].

Problème de découpe bidimensionnelle :

Ce problème constitue la généralisation directe du problème précédent en 2D, où un ensemble de rectangles doit être découpé dans un contenant de largeur fixe et de hauteur minimale. La résolution de ces problèmes est aussi bien basée sur des heuristiques [11] que sur des méthodes exactes [12].

4.4 Problèmes de sac à dos

Problème de sac à dos unidimensionnel :

Le problème du sac à dos 1D est un problème de recherche opérationnelle très répandu et étudié depuis de nombreuses années [13]. Le problème consiste à sélectionner un ensemble de composants ayant chacun un poids et un profit de manière à maximiser le profit total tout en respectant une contrainte de poids maximum. À chaque composant est associée une variable binaire qui modélise la sélection ou non du composant dans le sac à dos. Les méthodes de résolution exacte pour ce problème sont la programmation dynamique et la procédure d'évaluation et de séparation. Les méthodes de résolution approchée regroupent les algorithmes génétiques, les algorithmes de colonies de fourmis, et bien d'autres méthodes encore. Le problème possède de nombreuses variantes, qui font toutes l'objet de plusieurs recherches.

Problème de sac à dos multi-dimensionnel :

Le problème de sac à dos peut être décliné en 2D et en 3D. En 2D, les composants et le contenant sont des rectangles alignés sur le système d'axe. En 3D, les éléments sont des parallélépipèdes rectangles. Dans le cas général, on parle de boîtes. Le problème

déchargement de containers peut être vu comme un problème de sac à dos multi-dimensionnel. Il existe deux types de problèmes de chargement de containers :

Les chargements de type sac à dos (**Knapsack Loading**) : Chaque boîte à un profit associé, et le problème consiste à choisir un ensemble de boîtes qui maximise le profit. Si le profit d'une boîte est égal à son volume, alors le problème correspond à une minimisation de l'espace perdu, c'est le problème classique du chargement de containers.

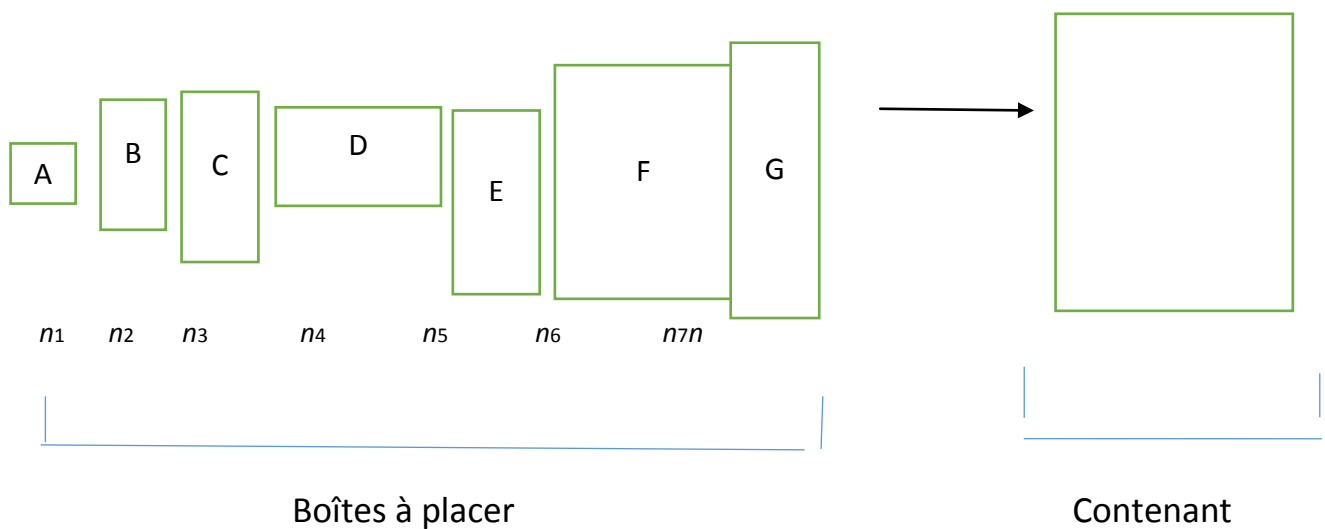
5. Le problème de bin packing à deux dimensions

Le problème de *bin packing* ou empaquetage 2D (2BP) consiste à trouver le nombre de minimum de contenants rectangulaires identiques pouvant accueillir une série de composants rectangulaires. Ces derniers sont rangés de telle façon que leurs arêtes soient parallèles à celles des contenants (on parle de rangement orthogonal). Le problème constitue une extension directe du problème de *bin packing* 1D.

La figure 5 présente un exemple avec une série de sept types de composants à placer dans un nombre minimum de contenants identiques. Ce problème a de nombreuses applications industrielles, en particulier dans l'industrie de la découpe et dans la logistique.

Lorsque l'ensemble des composants a une hauteur identique, on retrouve le problème de *bin packing* à une dimension (1BP). Puisque 1BP est connu comme étant NP-difficile, il en va naturellement de même pour 2BP. Lodi *et al.* [14] ont proposé la typologie suivante permettant de catégoriser les différents problèmes de *bin packing*. Cette typologie est basée sur la prise en compte des rotations orthogonales des composants ainsi que sur le type de découpe. La rotation de 90° des rectangles permet d'augmenter la taille de l'espace de recherche, ainsi que la probabilité de trouver une meilleure solution. Enfin dans les problèmes de découpe, une contrainte de type guillotine peut être imposée : l'ensemble des composants doit être obtenu à partir d'une séquence de coupes horizontales et verticales du contenant. Le codage de Lodi *et al* [14]. Se résume de la manière suivante :

- **2BP|OG** : les composants sont orientés (**O**), le découpage *guillotine* (**G**) est requis.
- **2BP|RG** : les composants peuvent subir une rotation de 90° (**R**) et le découpage *guillotine* (**G**) est requis.
- **2BP|OF** : les composants sont orientés (**O**) et le découpage est *libre* (**F**).
- **2BP|RF** : les composants peuvent subir une rotation de 90° (**R**) et le découpage est *libre* (**F**).



Exemple de solution pour $n_1 = 3$, $n_2 = 3$, $n_3 = 2$, $n_4 = 2$, $n_5 = 2$, $n_6 = 1$, $n_7 = 1$ et $n = 2$

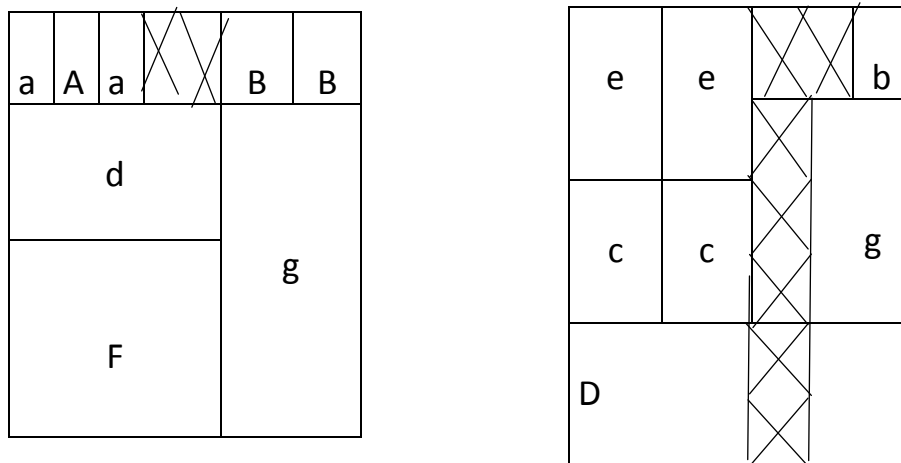


Figure 16: Exemple de problème d'empaquetage (2DBP)

5.1 Problème de découpe de formes irrégulières

Le problème de découpe de formes irrégulières (***Nesting problem***) consiste à positionner un ensemble de composants 2D de géométries complexes dans un contenant ayant des dimensions minimales, l'objectif étant de minimiser les chutes générées par la découpe des composants. Le problème est principalement rencontré dans les industries textile et métallique. Dans le cas où le contenant est de forme rectangulaire, on parle de problème de découpe en bande (***Strip packing problem***). Le problème est un problème NP -difficile et peut être classé comme 2D-IDP (***two-dimensional Irregularopen dimension problem***) selon la typologie de Wäscher [3]. Comme pour les autres problèmes, de nombreuses variantes existent. Certaines sont des cas particuliers, comme lorsque l'ensemble des composants est identique.

D'autres sont des extensions nécessitant une généralisation des modélisations proposées.

5.2 Problèmes de conditionnement 3D d'objets de géométries quelconques

Le problème de conditionnement 3D d'objets de géométries quelconques, aussi connu sous le nom de ***3D packing***, consiste à placer un maximum de composants de formes irrégulières dans un contenant lui aussi de forme quelconque. Ce problème trouve des applications dans des problèmes de chargement de coffre ou encore dans le prototypage rapide par frittage LASER (***Selective LASER Sintering –SLS***). Le prototypage rapide est un terme originellement utilisé pour la production de prototypes de modèles CAO. Aujourd'hui, les technologies de prototypages rapides sont utilisées pour la fabrication de composants.

6. Les problèmes d'agencement

Un problème d'agencement est défini comme un problème de placement, pour lequel un positionnement relatif des composants à l'intérieur du contenant est recherché. Dans de tels problèmes, les composants et le contenant sont fonctionnellement et géométriquement reliés entre eux. Comme les problèmes C&P, les problèmes d'agencement sont NP -difficiles.

La figure 6 présente les différents éléments d'un problème d'agencement. On retrouve sur cette figure les éléments des problèmes C&P, auxquels ont été ajoutées les spécificités liées aux problèmes d'agencement.

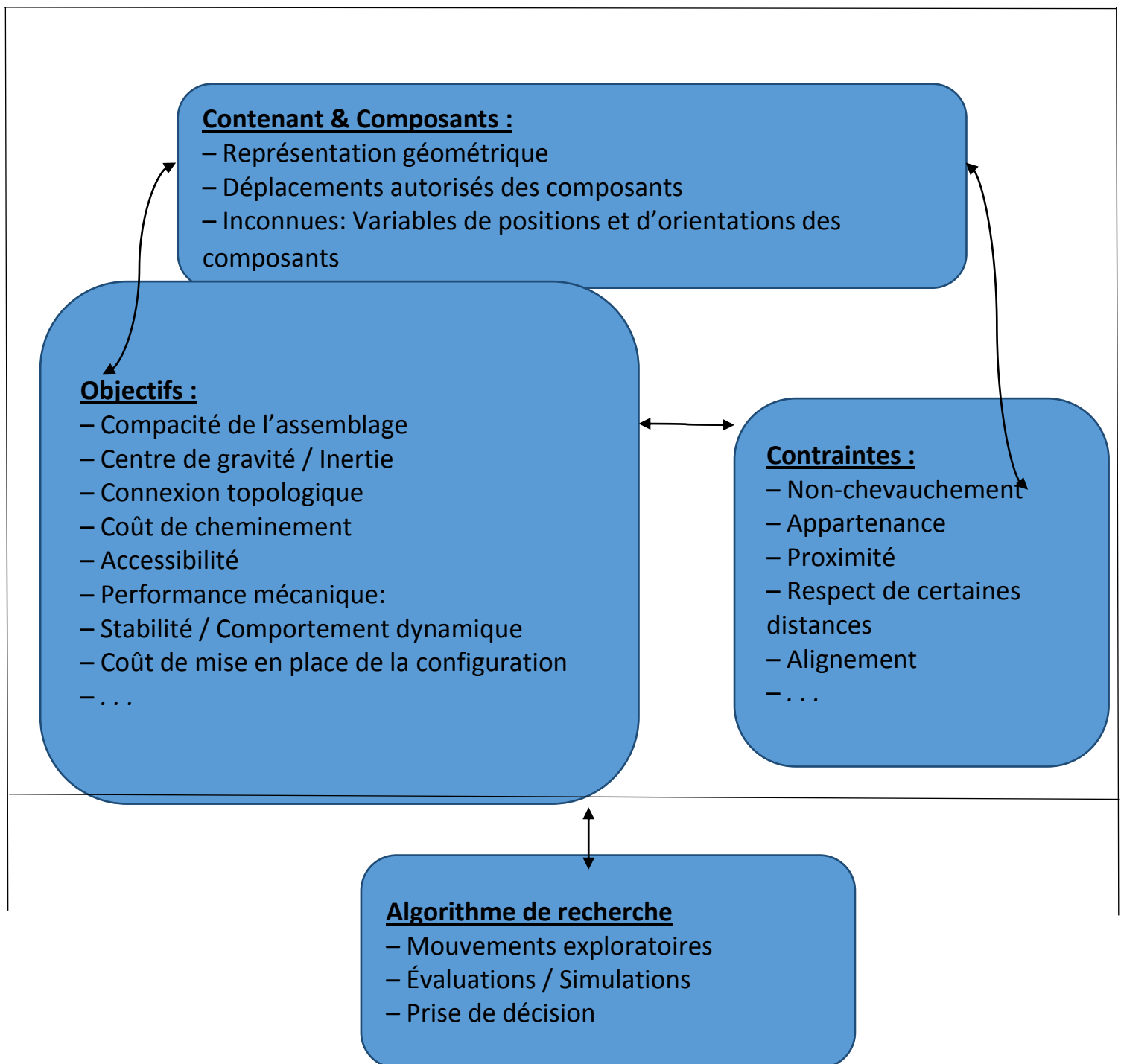


Figure 17: Exemple de problème d'emballage (2DBP)

La plupart des techniques de résolution utilisées pour les problèmes C&P ne peut plus être utilisée ici. En revanche, les problèmes C&P peuvent être vus comme des cas particuliers des problèmes d'agencement. Par conséquent, les techniques de résolution développées pour la résolution d'agencement peuvent être utilisées pour la résolution des problèmes C&P.

Les problèmes d'agencement sont généralement présentés comme des problèmes multi-objectifs avec des objectifs contradictoires. Toutefois, la plupart des méthodes de résolutions proposées transforment les problèmes d'optimisation multi-objective en une optimisation mono-objective non contrainte.

Les problèmes classiques d'agencement concernent l'agencement de locaux, l'intégration de puces à grande échelle, l'agencement 3D dans les problèmes d'ingénierie.

6.1 Problèmes d'agencement bidimensionnel

Problèmes d'agencement de locaux :

Le problème d'agencement de locaux, ou d'agencement d'ateliers (**Facility layout problems**, abrégé **FLP**) consiste à agencer une série de composants 2D en optimisant les interactions entre eux

Les composants rencontrés dans ce genre de problèmes sont principalement des rectangles alignés sur le système d'axe, ou des ensembles de carrés adjacents. Ces problèmes sont caractérisés par les interactions entre composants, principalement exprimées comme des minimisations de flux.

Problèmes d'agencement tridimensionnel :

Les problèmes d'agencement tridimensionnel se retrouvent principalement dans les problèmes d'ingénierie, où des systèmes complexes et compacts sont élaborés. Ils sont caractérisés par des composants de géométrie complexe, des formulations d'objectifs difficiles, des temps de calculs longs liés à l'évaluation des objectifs et des contraintes. En effet, les objectifs peuvent être le résultat de simulations physiques coûteuses (calculs éléments finis, . . .). La géométrie des composants peut aussi entraîner des temps de calculs longs. Dans la majorité des exemples rencontrés, une méthode de placement relaxé est utilisée, et la géométrie des composants est approchée à l'aide des techniques d'*octrees*.

7. Comparaison des problèmes C&P et des problèmes d'agencement

La table 1 résume les différences entre les différents problèmes de placement. Les deux colonnes de cette table correspondent respectivement aux problèmes C&P ainsi qu'aux problèmes d'agencement. Chaque ligne met en avant une caractéristique d'un des deux

Problèmes de placement	
Problèmes C&P	Problèmes d'agencement
Les composants sont fonctionnellement indépendants les uns des autres.	Les composants sont fonctionnellement et géométriquement reliés entre eux.
La compacité est toujours l'objectif sous-jacent.	La compacité peut ne pas être un objectif du problème.
Tous les composants ont le même type d'attributs.	Les composants n'ont pas nécessairement les mêmes types d'attributs.
Les problèmes C&P sont principalement mono-objectif. Les problèmes multi-objectifs impliquent des types identiques d'objectifs.	Les problèmes d'agencement sont aussi bien des problèmes mono-objectifs que multi-objectifs.
Objectif(s) et contrainte(s) peuvent toujours être exprimés comme des fonctions mathématiques.	Objectif(s) et contrainte(s) peuvent ne pas s'exprimer comme des fonctions mathématiques. Ils peuvent être des valeurs données par le concepteur.
Les problèmes C&P prennent uniquement en compte les objectifs et contrainte(s) définis globalement	Les problèmes d'agencement peuvent contenir des objectifs et des contraintes de différents types : individuel, interaction, global.
Les objectifs peuvent toujours s'exprimer comme une maximisation sur les composants ou une minimisation le contenant	Les objectifs ne présentent pas de caractéristiques particulières.
Les objectif(s) et contrainte(s) impliquent les attributs de tous les composants.	Objectif(s) et contrainte(s) peuvent impliquer les attributs de tous les composants, mais pas nécessairement.
Les problèmes C&P présentent uniquement des contraintes de non-chevauchement et d'appartenance.	Les problèmes d'agencement possèdent des contraintes de non-chevauchement et d'appartenance, mais peuvent aussi avoir des contraintes spécifiques (Alignement, Mise à distance, . . .).
Les méthodes de résolution des C&P ne permettent pas de résoudre les problèmes d'agencement.	Les méthodes de résolution des problèmes d'agencement peuvent être utilisées pour la résolution des problèmes C&P.
L'évaluation des objectifs des C&P est quasi immédiate.	L'évaluation des objectifs des problèmes d'agencement peuvent être coûteuses et nécessitent de choisir des stratégies de recherche appropriées.

problèmes.

Tableau 1 : Comparaison des problèmes C&P et des problèmes d'agencement

8. Conclusion

Les problèmes de placement sont connus depuis bien longtemps, mais la recherche actuelle montre que ces problèmes ne sont entièrement pas résolus. Ils sont difficiles en bien des points. Pour les problèmes C&P, les efforts de recherche se portent actuellement sur l'amélioration des méthodes de résolution, pour obtenir de meilleurs résultats en moins de temps sur des instances toujours plus grandes.

Concernant les problèmes d'agencement, les efforts doivent autant se concentrer sur la définition et la formalisation des problèmes que sur les méthodes de résolution.

Chapitre 3 : problème avec des pièces irréguliers

Introduction

Notre mémoire est une continuité de ce qui a été fait par nos collègues de l'année passée sur le Nesting de la forme régulière (rectangulaire). Pour cela on a abordé le problème de l'emballage bin-dimensionnel où les pièces peuvent être n'importe quel forme (irrégulières). Ce problème se pose dans de nombreuses industries où il est nécessaire de découper des pièces de forme irrégulière à partir de plusieurs feuilles de stock de dimensions fixes, telles que du métal, du bois, du papier et du plastique. Malgré les nombreuses applications de la vie réelle, le problème a reçu relativement peu d'attention dans la littérature par rapport au problème d'emballage de bac rectangle ou au problème d'emballage de bande de forme irrégulière. De plus, la plupart des cas de problèmes d'emballage irréguliers limitent l'orientation des pièces à un, deux ou quatre angles d'orientation. Plus précisément, notre mémoire décrit une méthode de solution heuristique pour le 2DIP où les feuilles de stock sont homogènes et une solution réalisable est trouvée lorsque toutes les pièces sont emballées dans les bacs sans chevauchement entre les pièces. L'objectif est de minimiser le nombre total de bacs nécessaires pour couper toutes les pièces.

Notre approche s'inspire de la littérature sur l'emballage irrégulier des bandes et applique ces concepts à l'emballage des boîtes. En outre, la mémoire décrit de nouvelles fonctionnalités qui améliorent considérablement les performances de l'algorithme et le rendent plus généralement applicable.

1. Revue de littérature

Dans ce chapitre, nous donnons un bref aperçu de la littérature. Il convient de noter qu'il existe très peu de documentation sur ce problème spécifique. Ici, nous sélectionnons les articles les plus pertinents pour notre étude.

Les problèmes de placement de forme irrégulière présentent des défis supplémentaires associés à la gestion de la géométrie complexe qui peut rendre la génération de solution [18]. [19]. Ce que récemment que le domaine de la recherche a atteint sa maturité, avec une plus grande puissance de traitement informatique, pour faire de l'examen de plusieurs feuilles de stock une proposition fructueuse plutôt que de résoudre chaque feuille de stock séparément. Par conséquent, la littérature couvrant explicitement le 2DIBPP est limitée. [18]. [19]. Tous décrivent une approche hyper-heuristique basée sur un algorithme génétique pour la 2DBPP pour des formes régulières et irrégulières. Ils décrivent plusieurs heuristiques de sélection pour résoudre l'attribution des pièces aux bacs, y compris les variantes de premier ajustement, meilleur ajustement, remplissage. Pour ces derniers, la position des morceaux dans la case allouée est déterminée par l'algorithme Bottom-Left (BL) développé par [20] ou une version améliorée en bas à gauche (BLLT) proposée par [21] ou

une variante de l'approche constructive présentée par [22]. [23] résoudre le problème de stock de coupe de forme irrégulière. Les problèmes de matériel de coupe sont légèrement différents des problèmes d'emballage des bacs. Alors que les deux emballent plusieurs feuilles de stock, le problème de stock de coupe a de nombreuses copies de chaque pièce, d'où l'ensemble des pièces est faiblement hétérogène. Par conséquent, plusieurs copies d'une disposition particulière peuvent être coupées pour répondre à la demande. Ils proposent une procédure de génération de colonnes, où le problème principal détermine le nombre de copies de chaque mise en page, et le sous-problème est résolu de manière heuristique pour générer une mise en page bin. Ils ont étudié trois approches de solution ; la génération de colonnes, la génération de colonnes adaptée qui permet moins de modèles, et une procédure heuristique séquentielle pour comparer la qualité des solutions d'emballage.

1.1 Définition du problème

Étant donné une bande de papier rectangulaire B avec une largeur W et hauteur H, un ensemble de n pièces irrégulières P avec chaque pièce P_i une superficie définie, Le but du problème NESTING 2D est de trouver un emplacement qui maximise l'utilisation de la surface (feuille) et le nombre des pièces placées dans la feuille (le taux de remplissage). L'emballage doit satisfaire aux contraintes suivantes :

- 1/chaque pièce emballée doit être complètement emballée dans la feuille (le contenant).
- 2/les pièces sont rotatives.
- 3/ les pièces emballées ne doivent pas se chevaucher.

Question :

« Comment peut-on trouver le modèle mathématique qui a pour but d'optimiser la surface de la feuille dans un cas de NESTING 2D avec des pièces de formes irrégulières ... ? »

Astuce :

« On parle d'optimisation de la feuille donc l'objectif est de maximiser la surface utilisable de la feuille en minimisant les chutes. Donc l'idée est de prendre chaque pièce (forme) et la diviser en sous pièces (triangle, rectangle, carré, cercle, sectoriel circulaire, trapèze). Et trouvant le modèle mathématique pour Chaque pièce et on fait la sommation de toutes les modèles trouvés par les sous pièces.

2. Le modèle mathématique pour des différents forme irréguliers

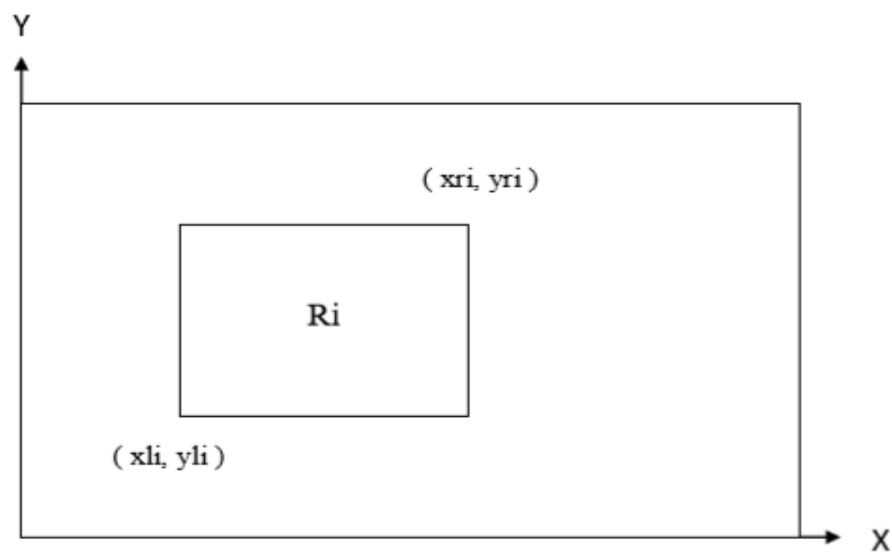


Figure 18: le point géométrique important basé par le modèle mathématique

Quelque notation

Notation	Signification	Etendu
I	Indice de la pièce (forme)	$i=1.....n_i \neq j$
J	Indice de la pièce suivante	$J=2.....n_j \neq i$
F	Variable de décision	$\{0,1\}$
W	La cote de la pièce	/
X, Y	Coordonnées de la pièce (les plus à gauche (xl) et les plus à droite (xr))	/
K	sectoriel circulaire	%

Tableau 2 : signification des variables et indices utiliser

A/Pour la forme rectangulaire :

La formulation mathématique du problème peut être décrite comme suit :

$$\text{Max } \sum_{i=1}^n \mathbf{F_i} \cdot \mathbf{W_i} \cdot \mathbf{h_i}$$

Sous Contraintes :

$$F_i = 0 \cup (0 \leq x_{li} < x_{ri} \leq w \cap 0 \leq y_{li} < y_{ri} \leq H). \dots\dots\dots(1)$$

$$F_i = 0 \cup (x_{ri} - x_{li} = w_i \cap y_{ri} - y_{li} = h_i) \cup (x_{ri} - x_{li} = h_i \cap y_{ri} - y_{li} = w_i) \dots\dots\dots(2)$$

$$F_i = 0 \cup f_j = 0 \cup (x_{li} \geq x_{rj} \cup x_{lj} \geq x_{ri} \cup y_{li} \geq y_{rj} \cup y_{lj} \geq y_{ri}) \dots\dots\dots(3)$$

$$F_i \in \{0, 1\} \dots\dots\dots(4)$$

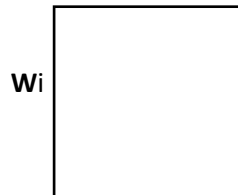
Avec :

(1) : signifie que les pièces seront complètement placées dans la feuille.

(2) : la possibilité

(3) : il n'y a pas le chevauchement entre les pièces

(4) : la pièce peut être placée dans la feuille comme elle ne peut pas

B/Pour la forme carrée (W_i, W_i) :

La formulation mathématique du problème peut être décrite comme suit :

$$\text{Max } \sum_{i=1}^n \mathbf{F_i} \cdot \mathbf{W_i}^2$$

Sous contraintes :

$$F_i = 0 \text{ ou } 0 \leq X_{Li} < X_{ri} \leq w \text{ et } 0 \leq Y_{Li} < Y_{ri} < H \dots\dots\dots(1)$$

$$F_i = 0 \text{ ou } X_{ri} - X_{Li} = W_i \text{ et } Y_{ri} - Y_{Li} = W_i \text{ ou } X_{ri} - X_{Li} = W_i \text{ et } Y_{ri} - Y_{Li} = W_i \dots\dots(2)$$

$$F_i = 0 \text{ ou } F_j = 0 \text{ ou } X_{Li} \geq X_{rj} \text{ ou } X_{Lj} \geq X_{ri} \text{ ou } Y_{Li} \geq Y_{rj} \text{ ou } Y_{Lj} \geq Y_{ri} \dots\dots\dots(3)$$

$F_i \in \{0,1\}$,(4)

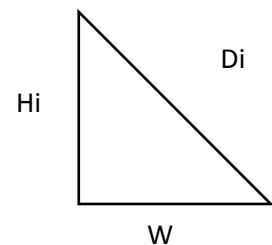
Avec

- (1) : toute pièce doit être emballée complètement dans la feuille.
- (2) : Les pièces sont rotatifs.
- (3) : il n'y a pas le chevauchement entre les pièces.
- (4) : la pièce peut être placé ou non

C /Pour la forme triangulaire :

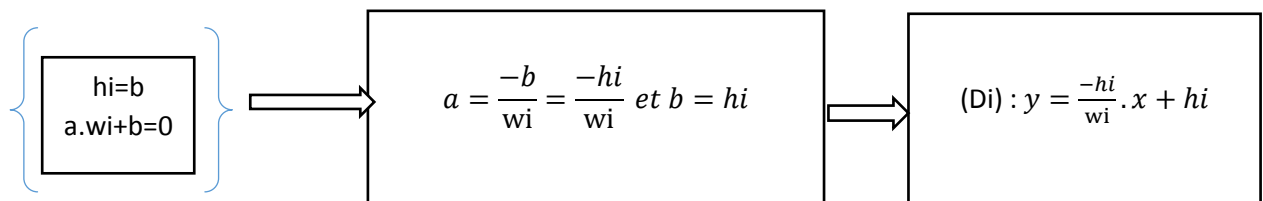
Dans ce cas on ne va pas calculer la superficie de la forme triangulaire par sa valeur **h** car il devenir le même calcul d'un rectangle.

Pour cela on a utilisé la Fonction symptomatique de tendon (**Di**) pour connaitre le coin supérieur d'un triangle.



$D_i : y = ax + b$

Passons par les points (0, h_i) et (W_i , 0)



Donc : $0 \leq X \leq W_i$ et $0 \leq y \leq \frac{-h_i}{w_i} \cdot x + h_i$

Donc on a le problème d'optimisation suivant :

$$\text{Max } \sum_{i=1}^n F_i \cdot (W_i \cdot h_i) \div 2$$

Sous contraintes

$$F_i=0 \text{ ou } 0 \leq X_{Li} < X_{Ri} \leq w \text{ et } 0 \leq Y_{Li} < \frac{-h_i}{w_i} \cdot X_{Li} + h_i \leq H \dots \dots \dots (1)$$

$$F_i=0 \text{ ou } X_{Ri} - X_{Li} = W_i \text{ et } Y_{Ri} - Y_{Li} = \frac{-h_i}{w_i} \cdot X' + h_i \text{ Ou } X_{Ri} - X_{Li} = \frac{-h_i}{w_i} \cdot X' + h_i \text{ et } Y_{Ri} - Y_{Li} = W_i$$

$$\text{Ou } X' = X_{Ri} - X_{Li} \dots \dots \dots (2)$$

$$F_i=0 \text{ ou } F_j=0 \text{ ou } X_{Li} \geq X_{rj} \text{ ou } X_{Lj} \geq X_{ri} \text{ ou } Y_{Li} \geq \frac{-h_j}{w_j} \cdot X_{Lj} + h_j \text{ ou } Y_{Lj} \geq \frac{-h_i}{w_i} \cdot X_{ri} + h_i \dots (3)$$

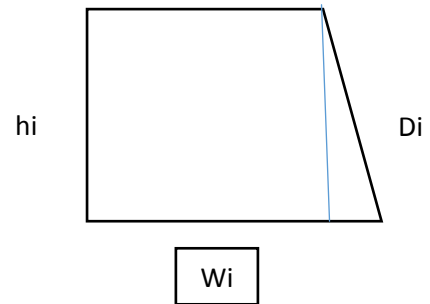
$$F_i \in \{0,1\}, i=1 \dots (4)$$

Avec

- (1) : toute pièce doit être emballée complètement dans la feuille.
- (2) : Les pièces sont rotatifs.
- (3) : il n'y a pas le chevauchement entre les pièces.
- (4) : la pièce peut être placée ou non

D/ Pour un trapèze :

Le considérer comme la somme d'un rectangle ou d'un carré avec un triangle.

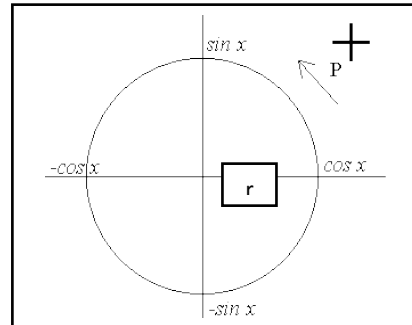


E / Pour un cercle :

$$X_i = r_i \cdot \cos \theta$$

$$Y_i = r_i \cdot \sin \theta$$

$$0 \leq \theta \leq 2\pi$$



La formulation mathématique du problème peut être décrite comme suit :

$$\text{Max} \sum_{i=1}^n (F_i \cdot \pi r_i^2) \div 1/k$$

Sous contraintes :

$$F_i=0 \text{ ou } 0 \leq X_{Li} < X_{ri} \leq w \text{ et } 0 \leq Y_{Li} < Y_{ri} \leq H \dots (1)$$

$$F_i=0 \text{ ou } (X_{ri}-X_{Li}=r_i \cdot \cos \theta \text{ et } Y_{ri}-Y_{Li}=r_i \cdot \sin \theta) \text{ Ou } (X_{ri}-X_{Li}=r_i \cdot \sin \theta \text{ et } Y_{ri}-Y_{Li}=r_i \cdot \cos \theta) \text{ et } 0 \leq \theta \leq 2\pi \dots (2)$$

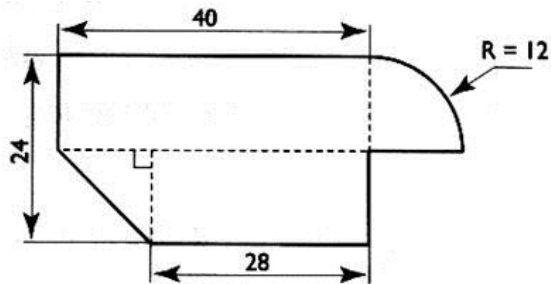
Remarque : Si on a un demi cercle $0 \leq \theta \leq \pi$.

$F_i=0$ ou $F_j=0$ ou $(X_{Li} \geq X_{rj}$ ou $X_{Lj} \geq X_{ri}$ ou $Y_{Li} \geq Y_{rj}$ ou $Y_{Lj} \geq Y_{ri}) \dots\dots\dots(3).$

$F_i \in \{0,1\} \dots\dots\dots(4)$

- (1) : toute pièce doit être emballée complètement dans la feuille.
- (2) : Les pièces sont rotatifs.
- (3) : il n'y a pas le chevauchement entre les pièces.
- (4) : la pièce peut être placé ou non.

E/ Exemple pour une forme irrégulière :



La fonction objective :

$$\text{Max } \sum_{i=1}^n F_i \cdot W_i \cdot h_i + \sum_{i=1}^n F_i \cdot W_i^2 + \sum_{i=1}^n (F_i \cdot W_i \cdot h_i) \div 2 + \sum_{i=1}^n (F_i \cdot \pi r_i^2) \div 1/k$$

Sous les contraintes suivantes :

//chaque pièce doit être emballé complètement dans la feuille (le rectangle)

$$\left[F_i = 0 \text{ u } (0 \leq x_{li} < x_{ri} \leq w \text{ n } 0 \leq y_{li} < y_{ri} \leq H). \right]$$

// Possibilité de pivotement de la pièce.

$$F_i = 0 \text{ u } (x_{ri} - x_{li} = w_i \text{ n } y_{ri} - y_{li} = h_i) \text{ u } (x_{ri} - x_{li} = h_i \text{ n } y_{ri} - y_{li} = w_i).$$

$$F_i=0 \text{ u } (X_{ri} - X_{Li} = W_i \text{ n } Y_{ri} - Y_{Li} = W_i) \text{ u } (X_{ri} - X_{Li} = W_i \text{ n } Y_{ri} - Y_{Li} = W_i).$$

$$F_i=0 \text{ u } (X_{ri} - X_{Li} = W_i \text{ n } Y_{ri} - Y_{Li} = \frac{-h_i}{w_i} \cdot X' + h_i) \text{ u } (X_{ri} - X_{Li} = \frac{-h_i}{w_i} \cdot X' + h_i \text{ n } Y_{ri} - Y_{Li} = W_i)$$

$$\text{u } X' = X_{ri} - X_{Li}.$$

$$F_i=0 \text{ u } (X_{ri} - X_{Li} = r_i \cdot \cos \theta \text{ n } Y_{ri} - Y_{Li} = r_i \cdot \sin \theta) \text{ u } (X_{ri} - X_{Li} = r_i \cdot \sin \theta \text{ n } Y_{ri} - Y_{Li} = r_i \cdot \cos \theta) 0 \leq \theta \leq 2\pi,$$

// Pas de chevauchement entre les pièces

$$F_i = 0 \cup F_j = 0 \cup (x_{li} \geq x_{rj} \cup x_{lj} \geq x_{ri} \cup y_{li} \geq y_{rj} \cup y_{lj} \geq y_{ri}).$$

$$F_i = 0 \cup F_j = 0 \cup X_{Li} \geq X_{rj} \cup X_{Lj} \geq X_{ri} \cup Y_{Li} \geq \frac{-h_j}{w_j} \cdot X_{Lj} + h_j \cup Y_{Lj} \geq \frac{-h_i}{w_i} \cdot X_{ri} + h_i$$

$$F_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, \dots, n.$$

3. Résolutions du problème en appliquant l'heuristique de JOSTLE pour les problèmes d'emballage bin-formes irréguliers avec rotation (2DBIPP)

Avantage :

- Heuristique rapide et fiable pour résoudre les problèmes d'emballage.
- Permet la rotation finie supprimant les contraintes artificielles habituellement imposé dans un emballage irrégulier
- Montre que le placement de longueur minimum surpasse le remplissage en bas à gauche en rotation finie.

3.1 Description du problème

Dans cette section, nous donnons une description plus formelle du problème.

Laisser $P = \{p_1, \dots, p_n\}$ être un ensemble de n polygones à emballer dans une feuille rectangulaire b . On note que la feuille d'objets rectangulaires à largeur fixe W et longueur fixe L .

Nous dénotons $P_i \subseteq P$ comme l'ensemble des pièces emballées et (n) indique le nombre de pièces placées dans la feuille b . Chaque morceau emballé (p_i), a un angle d'orientation $\theta_i \in [0, 360^\circ)$ et une position dans sa feuille allouée (x_i, y_i) , qui est la position de l'origine de la pièce. Nous considérons l'origine de chaque pièce comme le point d'angle inférieur gauche de la feuille englobant pour un angle de rotation donné et le coin inférieur gauche de la feuille. L'objectif est de minimiser les chutes tout en maximisant l'utilisation maximale de la feuille.

3.2 Procédure d'emballage

Dans cette section, nous décrivons tous les composants de l'approche qui supportent la construction d'une mise en page unique. La procédure d'emballage est une méthode dans laquelle nous devons identifier les positions de placement des candidats (pièces) et l'orientation de la pièce. Nous discutons également des critères de sélection qui seront choisis entre les candidats au placement.

Une méthode de résolution de 2DBIPP résout deux problèmes de décision principaux ; assigner des pièces et les placer dans la feuille. La majorité de la littérature sur la coupe et l'emballage qui considère les pièces irrégulières 2D se concentre sur l'emballage en bandes lorsqu'il y a une seule feuille de stock. Dans ce cas, la décision principale est de savoir où placer la pièce sur la bande dans le but de minimiser la longueur. Cette approche suit l'approche de l'emballage en bandes tout en imposant la division entre les classes, ce qui rend implicite l'allocation des classes dans les décisions de placement. La méthode proposée conduit toujours à un placement possible de la pièce suivante en traitant ensemble les décisions d'allocation et de placement.

L'approche vise à simuler la bousculade des pièces. L'utilité de ce principe a pour réduire la longueur d'emballage de la disposition pour le problème d'emballage de bande de forme irrégulière en déplaçant les pièces d'une extrémité de la bande à l'autre comme dans un mouvement de secousse. *'Ils ont appelé l'algorithme Jostle et suggèrent qu'il a été inspiré par le comportement humain naturel de secouer un conteneur pour encourager les objets à emballer ensemble aussi étroitement que possible'.* L'idée de base est de commencer par un ordre décroissant des surfaces des pièces et d'appliquer une heuristique constructive en suivant une politique de placement de la position la plus à gauche des bords extérieurs de la bande vers le centre. Une fois que toutes les pièces sont emballées, Jostle procède à l'enlèvement des pièces dans l'ordre de la plus grande à la plus petite x-coordonnée et emballe à l'extrémité opposée la feuille de stock en utilisant une bonne politique et en remplissant les trous (vide). L'itération suivante prend l'ordre d'empaquetage de la plus petite à la plus grande x et coordonne à nouveau avec la politique la plus à gauche, et simulant ainsi la bousculade des pièces d'une extrémité de la feuille de stock à l'autre. Notez que l'emballage de gauche à droite et de droite à gauche s'appelle **un cycle de Jostle**. Au moment de la publication, l'approche a généré les meilleurs résultats sur les ensembles de données de référence. Depuis ce travail, les chercheurs ont développé des méthodes plus efficaces pour manipuler la géométrie et utiliser des ordinateurs plus puissants. Dans ce mémoire, nous appliquons les principes de Jostle au problème homogène de l'emballage multiple.

Afin d'adapter Jostle au problème de l'emballage, Nous pouvons directement appliquer Jostle à la bande avec la contrainte supplémentaire que les pièces ne peuvent pas être placées à travers une barrière. Avec les contraintes habituelles de confinement (appartenance) et de chevauchement, cela garantit que les pièces sont toujours placées entièrement dans la feuille.

3.3 Algorithme de construction

Dans cette section, nous présentons la méthode en une seule passe, qui est composée de l'ordre d'emballage des pièces et de la politique de placement. L'ordre d'emballage est une séquence générée de façon citée précédemment pour la première construction de mise en page et est ensuite décidé par Jostle. La politique de placement établit les critères pour comparer les positions de placement et les orientations de la prochaine pièce à placer, où tout poste candidat doit être réalisable en ce qui concerne le chevauchement et le confinement dans la feuille.

Toute approche de solution à un problème d'emballage impliquant des formes irrégulières nécessite des outils de calcul pour manipuler la géométrie. Plus précisément, les heuristiques de recherche nécessitent un test efficace pour identifier les positions de placement réalisables des pièces. L'ensemble d'outils est basé sur le polygone no-fit (polygone non ajusté) (**NFP**) et le polygone d'ajustement interne (**IFP**) obtenus. Puisque les pièces peuvent être placées dans n'importe quelle orientation, il y a une infinité de **NFPs** possibles, il est donc nécessaire de les générer en ligne selon les besoins. Afin de placer une pièce, l'algorithme doit générer plusieurs (**NFPs**), un pour chaque pièce placée avec la pièce suivante à placer. L'étude montre qu'il est significativement plus efficace de fusionner séquentiellement toutes les pièces placées dans un seul polygone et de générer ensuite un (**NFP**) unique.

L'algorithme de construction proposé représente la solution partielle existante sous la forme d'un tableau de polygones (**mj**) où chaque (**mj**) est le polygone généré en fusionnant l'ensemble des pièces emballées dans la région (b) (équivalent à une feuille). L'algorithme conserve tous les espaces fermés entre les pièces lorsqu'une pièce est fusionnée avec la solution partielle existante. Ces espaces forment des trous dans le polygone fusionné, qui sont mis à disposition pour le placement des pièces suivantes à condition que la superficie du trou soit supérieure à la superficie de la plus petite pièce non emballée. Laisser (**Hk:h1,...,hq**) le jeu de trous générés après avoir placé le **k ième** pièce. La figure 18 fournit un exemple de deux régions qui représentent des compartiments et contiennent un certain nombre de pièces emballées. Les groupes de pièces emballées sont fusionnés en deux polygones **m1** et **m2**, qui contiennent des trous utilisables **h1** et **h2**. Notez que les trous trop petits sont ignorés. Les espaces en dehors de (**mj**) sont désignés par (**Si**).

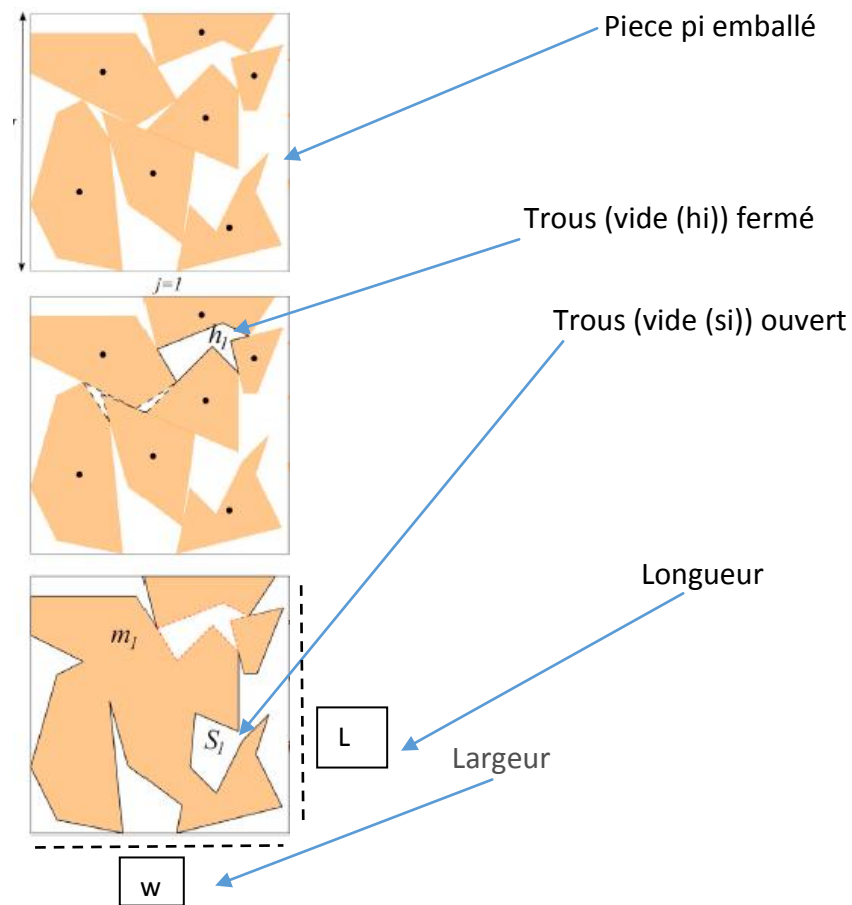


Figure 19: les principaux caractéristique d'un placement 2D

4.1. Générer des positions de placement de candidats

Dans cette section, nous décrivons l'approche pour identifier les positions candidates possibles pour la prochaine pièce, (p_i) , y compris son orientation. (p_i) peut être placé dans un trou, dans un espace ou dans une nouvelle zone de la feuille à la fin de la disposition. Nous décrivons ci-dessous la procédure à suivre pour déterminer si (p_i) s'adapte dans un trou ou un espace particulier dans un bin partiellement emballé et la gamme d'orientations.

Chaque trou (h_l) est représenté comme un simple polygone. Si la zone de (h_l) est inférieure à la zone de (p_i) puis (p_i) ne rentre pas dans (h_l) . Sinon, la procédure génère l'**IFP** entre (h_l) et p_i (**IFP $h_l p_i$**). L'intérieur et la limite de l'**IFP** représentent toutes les positions relatives des deux polygones composants de sorte que le second polygone d'indice, (p_i) , correspond à l'intérieur du premier polygone d'indice, (h_l) . Voir la Fig. 19. La limite de l'**IFP** contient toutes les positions où les limites des polygones touchent et cela forme l'ensemble des positions de placement réalisables dans le trou. Si l'**IFP** n'existe pas alors (p_i) ne rentre pas dans (h_l) .

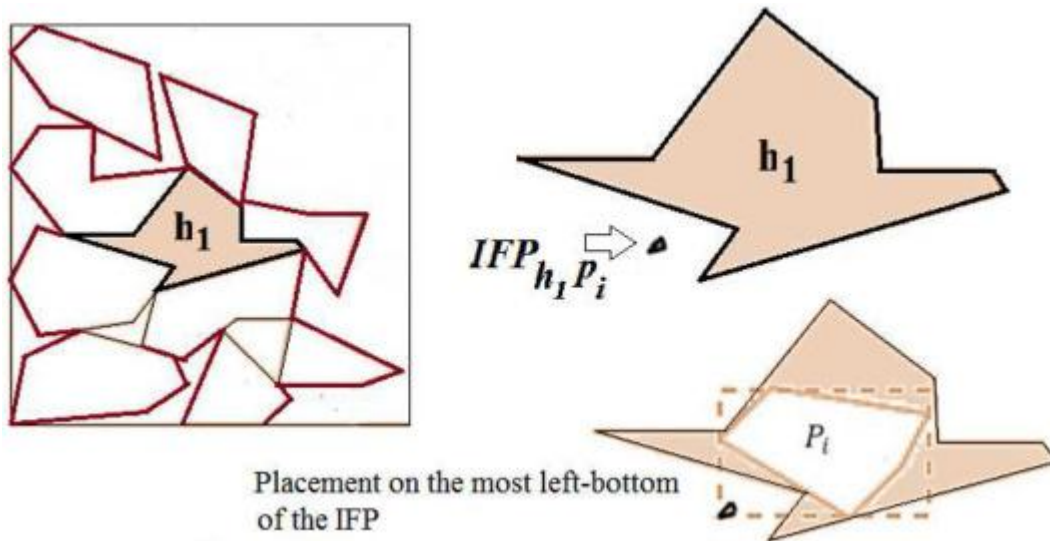


Figure 20: Remplissage de trous

Afin de trouver les positions de placement réalisables dans une région de la feuille contenant des polygones (m_j) , nous générons le **NFP** entre la limite externe de (m_j) et (p_i) , (**NFP $m_j p_i$**) et l'**IFP** entre la région de la feuille (b) et (p_i) , (**IFP $b p_i$**). L'extérieur et la limite du **NFP** représentent toutes les positions relatives des deux polygones composants où ils ne se chevauchent pas. L'intersection de la **IFP $b p_i$** et le complément de **NFP $m_j p_i$** fournit toutes les positions de (p_i) tel qu'il est contenu dans (b) et ne se chevauchent pas avec (m_j) , en supposant (b) et (m_j) avoir une position fixe. Nous considérons seulement le segment de

limite du NFP_{mjpi} qui croise avec IFP_{bjpi} comme l'ensemble réalisable, qui est toutes les positions touchantes réalisables entre (mj) et (pi) . Voir la Fig.20 pour un exemple de cette évaluation.

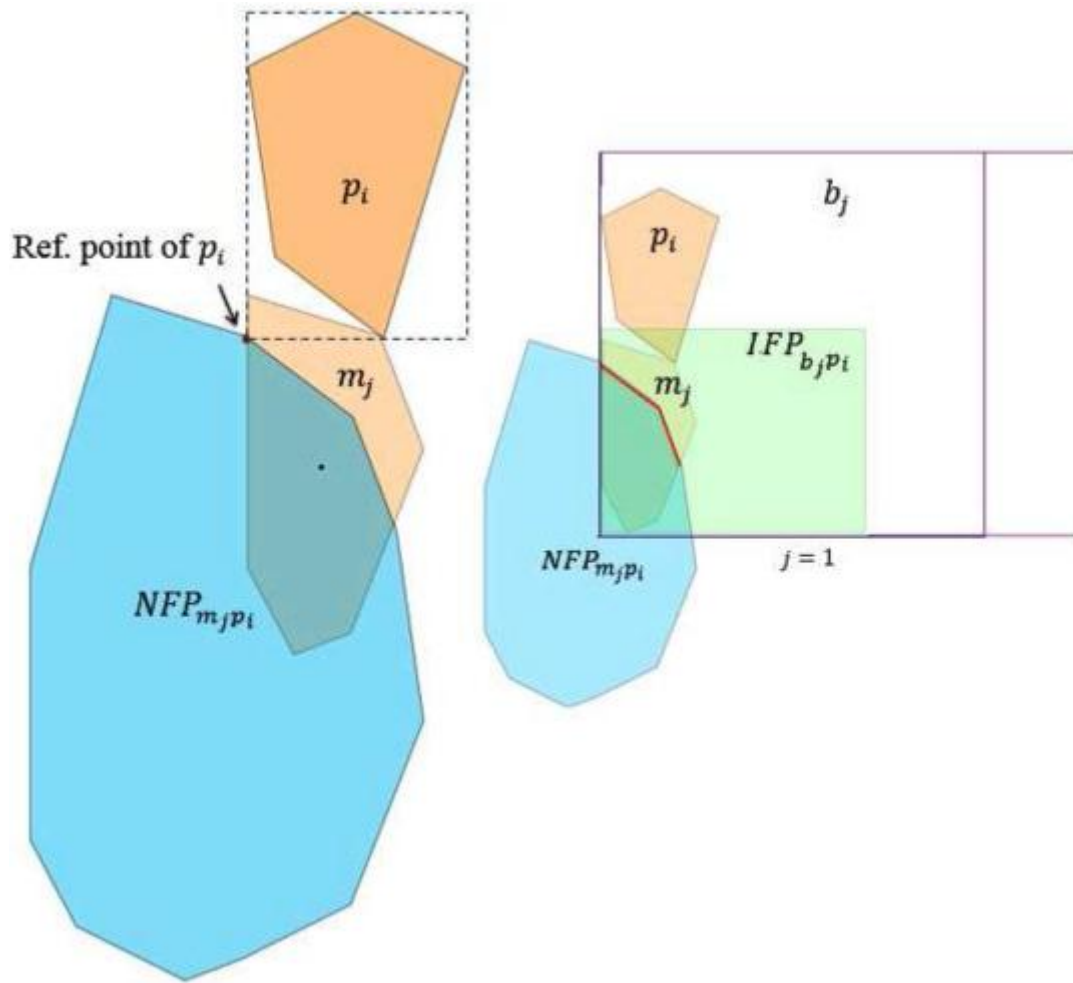


Figure 21 Placement possible pour une nouvelle pièce

3.4 Orientation de placement d'une pièce

La discussion ci-dessus suppose (pi) est dans une orientation donnée. Nous considérons le scénario ce qui concerne les pièces en rotation. Premièrement, nous permettons aux pièces de pivoter selon un ensemble d'angles prédéfinis, que nous définissons comme l'approche par rotation finie. C'est le cas le plus courant dans la littérature où les angles de rotation des pièces sont limités à $(\alpha_j)=0^\circ, 180^\circ$ ou $\alpha=0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$.

Dans le cas des angles de rotation finie, nous considérons simplement (pi) dans chacune des quatre orientations. Pour chaque orientation, nous générons l'ensemble des positions de placement réalisables, et sélectionnons le meilleur selon les critères de la politique de placement, décrits dans la section suivante.

3.5 Politique de placement

Les procédures ci-dessus fournissent un ensemble de positions de placement réalisables et des orientations pour la pièce (**pi**). La politique de placement définit les critères qui déterminent la position choisie. Notez que pour certaines des règles de placement, nous pouvons souvent éviter le coût de calcul de l'évaluation de toutes les positions en contrôlant l'ordre dans lequel elles sont évaluées. Dans ce qui suit, nous décrivons les règles de placement dans le contexte de l'emballage à partir de l'extrémité gauche de la bande s'étendant vers la droite. Cependant, Jostle emballe également de droite à gauche, auquel cas il suffit d'échanger à gauche et à droite dans l'explication suivante.

Nous évaluons trois règles de placement bien connues ; placement en bas à gauche, placement de longueur minimum et placement maximum d'utilisation, pour déterminer la position de chaque pièce. Cependant, ces règles sont dominées en essayant d'abord de remplir les trous dans la mise en page.

La première étape lors du placement (**pi**) est de trier tous les trous (**Hk**) dans l'ordre décroissant des surfaces. Ces trous sont évalués dans cet ordre en utilisant la procédure de remplissage des trous. Si (**pi**) s'adapte dans un trou donné, il est placé et aucun autre trou n'est considéré. Si (**pi**) ne correspond à aucun trou, l'algorithme tente de trouver une position de placement réalisable dans chacune des régions (**b**) en commençant par la plus égale à la surface de **pi**. En utilisant la procédure décrite dans la section 3.4 pour trouver les positions de placement et l'orientation dans une feuille partiellement emballé, les positions candidates sont trouvées (**b**) en ordre. Les stratégies de placement sont les suivantes :

A/Bas-gauche (BL) donne la priorité à placer le point de référence de la pièce dans la position la plus à gauche possible sur les liens de rupture de feuille de stock en sélectionnant le plus bas des positions les plus à gauche. Il s'agit d'une règle de placement à passage unique bien connue appliquée dans de nombreux papiers de coupe et d'emballage. En appliquant cette règle lorsque le remplissage du trou échoue, une fois qu'une position possible est trouvée dans la région (**b**) la recherche peut s'arrêter. Si plus d'une orientation de (**pi**) donne la même position BL, sélectionnez l'orientation qui minimise la largeur de la boîte englobante de la pièce. S'il y a toujours une égalité, sélectionnez l'orientation de manière aléatoire.

B/La règle de placement Longueur minimale (ML) sélectionne la position qui minimise la longueur entre l'origine de la feuille et la coordonnée x la plus à droite de (**pi**). La pièce est orientée pour minimiser la coordonnée x la plus à droite. En cas d'égalité, nous sélectionnons la position de placement en bas à gauche.

C/La règle de placement Utilisation maximale (MU) sélectionne la position qui fournit l'utilisation maximale de la zone dans la première case. Nous assumons la zone occupée d'une région(**b**) est la zone de la coque convexe de (**mj**). Laissez la zone de la coque convexe de(**mj**) être région (**mj**), la zone de (**pi**)être zone (**pi**) et la zone de la coque convexe du nouveau polygone fusionné après (**pi**) est placé dans une certaine position soit région (**mj+pi**). Ensuite, l'utilisation de la position de placement (**Utp**) est calculée comme suit.

Utp=région(mj)+région(pi) / région(mj+pi)

Compte tenu de l'ensemble des positions de placement réalisables à la limite du NFP, nous sélectionnons chaque sommet possible du NFP en tant que poste de placement candidat. Ceci est illustré à la Fig. 21 . Les positions de placement sont évaluées par feuille en commençant par la case la plus à gauche. Si un placement réalisable est trouvé dans une feuille alors il y a fortement une possibilité de placement. Les liens sont rompus en sélectionnant la position en bas à gauche et l'orientation de longueur minimale.

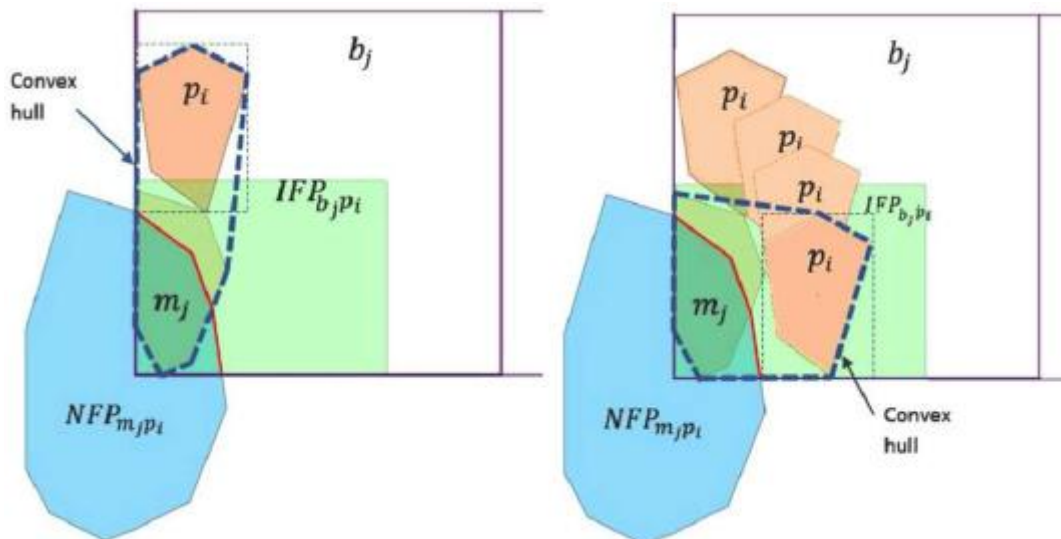


Figure 22:Placement de la pièce sur différents sommets le long du segment de placement réalisable.

D/La règle de placement Utilisation maximale (MU) sélectionne la position qui fournit l'utilisation maximale de la zone intérieure de la pièce. Nous assumons la zone occupée d'une région(**b**) est la zone de la coque **concave** de (**mj**). Laissez la zone de la coque **concave** de (**mj**) être région (**mj**).

Pour résoudre ce problème, nous utilisons l'heuristique "**first-fit-decreasing**". Les pièces plus grandes sont placées en premier et les pièces plus petites en dernier. Ceci est assez intuitif, car les parties plus petites ont tendance à agir comme du sable pour combler les vides laissés par les parties plus grandes. Bien que cette stratégie nous donne un bon départ, nous voulons explorer davantage l'espace de la solution. Nous pourrions simplement randomiser l'ordre d'insertion.

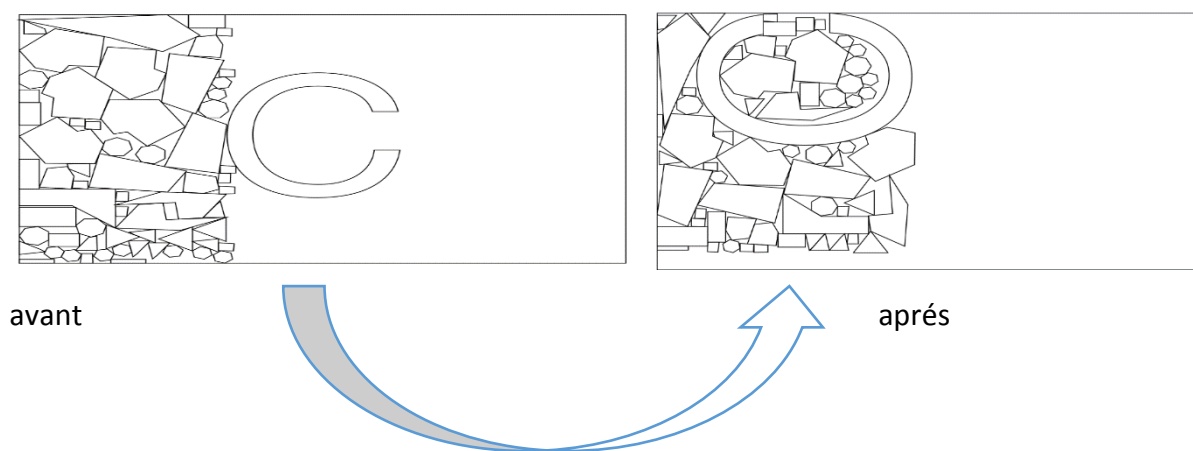


Figure 23 : optimisation de la coque concave de la pièce (forme)

4. Le Logiciels de Nesting

4.1 Introduction

Les logiciels de nesting est utilisé pour adapter de manière optimale de nombreuses pièces de fabrication différentes à une seule feuille de matière première. Optimal signifie que vous obtenez les pièces que vous voulez en quantités exactes, au coût le plus bas possible ; le coût le plus bas comprend l'efficacité matérielle, l'efficacité de la machine, l'achèvement de l'ordre et toutes les autres considérations relatives aux coûts. En termes généraux, le logiciel de nesting organise automatiquement et efficacement les quantités requises de pièces individuelles à produire sur des feuilles ou des plaques de matière en stock. Il le fait en utilisant la géométrie partielle à partir de fichiers CAO pour produire un code CNC qui contrôle une machine à découper. [16]

Dans le monde de la CNC, cela s'appelle « imbrication », et les logiciels qui le font sont généralement destinés aux clients industriels et **très coûteux**.

4.2 Notre logiciel (M2 GI-2018)

M2 GI-2018 est un logiciel de placement automatique pour l'optimisation de l'utilisation des surfaces et de la découpe. Il permet la minimisation des pertes et l'utilisation optimale du matériau à découper ou à placer.


[▶ Vas-y](#)
[📄 Télécharger SVG](#)
[Aide](#)

Figure 24:Le logiciel de Nesting M2 GI-2018

4.3 Avantages et efficience

Lorsque nous parlons d'efficacité, nous parlons d'économiser de l'argent et du temps, Nous prenons l'exemple d'entreprise ACME pour comprendre plus, ACME a une dépense matérielle mensuelle de 50 000 \$, Cependant 25% du coût est une perte de 12 500 \$ par mois en dépenses gaspillées. ACME a réussi à réduire le taux de chute de 10% ou 1 250 \$ avec le logiciel de nesting. Déduisant leur paiement de location de 500 \$ par mois, ils ont une réduction de coût net de 750 \$ par mois. [17]

Voici les grands avantages de l'utilisation du logiciel de nesting :

- Efficacité matérielle :

Signifie économiser du matériel, L'approche exclusive du logiciel de nesting peut signifier une augmentation de 8 à 20% des économies de matériaux par rapport à l'approche actuelle.

- Temps de programmation :

Obtenez l'imbrication et la programmation de la machine en quelques minutes ; Pas des heures. Créez de meilleurs nids qui ont également considérablement réduit la main-d'œuvre des ateliers ! Laissez un logiciel intelligent vous faire économiser du temps, de l'argent, des efforts et des maux de tête.

- Augmenter le débit :

Fabrique plus de pièces avec moins d'erreurs en moins de temps. Vos machines de fabrication CNC (poinçon à tourelle, laser, plasma, etc.) peuvent être plus productives grâce à un logiciel de nesting avancé. On utilise généralement des machines à 90% des cycles de service et au-dessus ; Doubant souvent le débit.

- Contrôle de qualité :

Les pièces endommagées, les pièces perdues, les pièces incorrectes et les quantités de pièces sont le mal de tête de chaque fabricant. Ils causent du chaos sur le sol et sont un drain de trésorerie dans le back office. Créez les bonnes pièces la première fois, à chaque fois.

- Réduire les frais généraux :

Économiser sur l'usure de la machine avec des nids plus efficaces. Réduisez considérablement le temps d'installation, le temps de manipulation et le temps de déchargement. Utilisez le logiciel pour piloter tous les équipements de fabrication CNC ; Économisez encore plus.

- Améliorer les flux de trésorerie :

Un logiciel ne coûte rien : Chaque client obtient au moins 100% de rendement en première année. Lors de l'utilisation du logiciel, les fabricants réalisent généralement un rendement annuel supérieur à 100% sur leur investissement chaque année. Réduisez les dépenses mensuelles et créez des flux de trésorerie supplémentaires en économisant davantage sur les matières premières que vous dépensez sur un contrat de logiciel.

4.4 Paramètres de configuration de logiciel

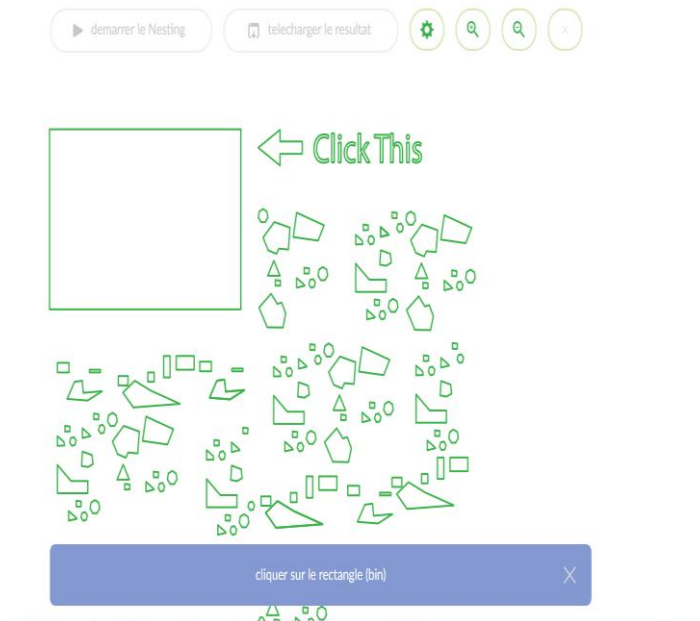


Figure 25 : L'interface d'imbrication de logiciel

a) Espace entre les pièces :

Ce paramètre va orienter le logiciel de quel type d'imbrication doit le faire (placement unique ou coupe).

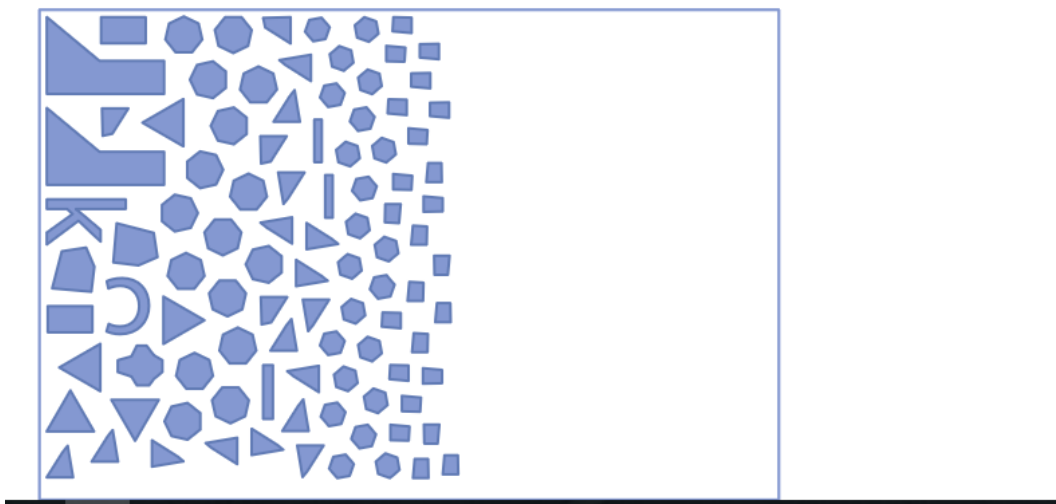


Figure 26: Imbrication avec un espace entre les pièces

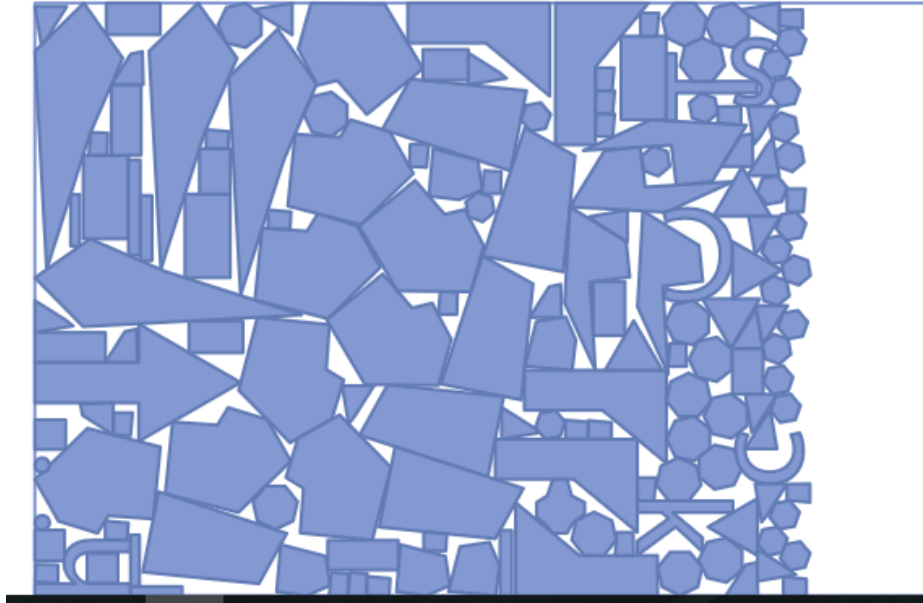


Figure 27 : Imbrication sans espace entre les pièces

b) Rotations de la pièce :

Le nombre de rotations possible à évaluer pour chaque pièce. Par exemple, 4 pour seulement les directions cardinales ($0 - \pi/2 - \pi - 3.\pi/2 - 2.\pi$). Des valeurs plus grandes peuvent améliorer les résultats, mais elles seront plus lentes à converger.

c) Partie en partie :

Lorsque cette option est activée elle autorise le placement des pièces dans les trous des autres pièces.

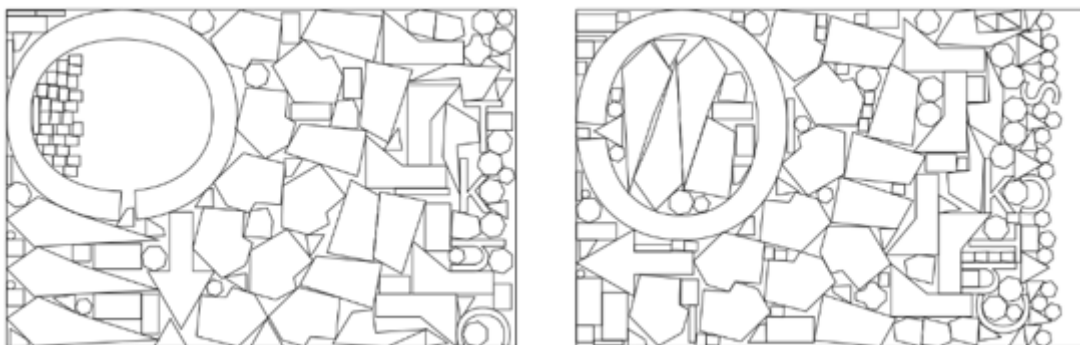


Figure 28: L'utilisation de la zone concave d'autres pièces

Conclusion

Dans ce chapitre, nous définissons le problème de packing avec les pièces irrégulières et nous avons donné les articles les plus populaires dans ce domaine. Après nous avons donné un modèle mathématique qui résout ce problème très complexe et une heuristique inspirée par un algorithme plus récent (sept 2017) qui a fait notre classement au niveau mondial, et finalement on développe un logiciel basé sur notre heuristique et que nous avons pensé qu'il nous donne la meilleure solution par rapport aux autres logiciels commercialisés, et nous expliquons également comment ce logiciel peut résoudre même un problème de découpe.

Conclusion générale et perspectives

Le problème de découpe et placement l'objectif est surtout maximiser le taux d'utilisation de la surface de travail pour moins de chutes, alors que plusieurs algorithmes et heuristiques se présentent, après plusieurs recherche et compréhension des types de problèmes, dans cette première étude, nous avons introduit une nouvelle méthodologie pour faire face au problème C&P 2D, qui repose sur un type particulier d'imbrication entre une méthode de recherche méta-heuristique et une politique de placement bien connue (en bas à gauche) présenter dans le chapitre 3 pour le problème de placement en deux dimensions des pièces irrégulières.

L'imbrication (Nesting) est un outil indispensable à une entreprise de découpe et usinage CNC puisqu'elle offre un gain de temps et une optimisation du stock en générale. Les leaders de manufacture adaptent pour chaque type de matière et pour chaque type de machine un système automatisé de Nesting dédié pour une meilleur planification et gestion dans un atelier opérationnel.

Après avoir travaillé dans ce projet, nous avons pensé à des idées pour développer le projet et créer d'autres horizons et opportunités pour nous bien sûr et aussi pour inspirer les autres à continuer à travailler dans ce projet et à l'améliorer pour le meilleur.

La première idée, il s'agit de réaliser une machine CNC et utiliser notre logiciel de Nesting avec notre puissant algorithme pour la résolution de découpe.

Deuxième idée, il s'agit de développer notre algorithme pour améliorer la solution de ce problème et nous donner les meilleurs résultats dans le meilleur temps.

Troisième idée, il s'agit de transformer le 2DIBPP en 3DIBPP.

Références bibliographiques

- [1] H. Dyckhoff, «A typology of cutting and packing problems. European Journal of Operational Research, 44(2),» janvier 1990.
 - [2] S. Yin, «A computational framework for automated product layout synthesis based on extended pattern search algorithm. Thèse de doctorat, Carnegie Mellon University, Pittsburgh,» 2000..
 - [3] H. H. e. H. S. Gerhard Wäscher, «An improved typology of cutting and packing problems. European Journal of Operational Research, 183,,» décembre 2007..
 - [4] H.-F. T. e. Y.-J. S. :. Bao Zhang, «Layout optimization of satellite module using soft computing techniques. Applied Soft Computing, 8(1),» 2008..
 - [5] K. F. S. N. e. Y. K. :. Hiroshi Murata, «VLSI module placement based on rectangle-packing by the sequence-pair. IEEE Trans. on CAD of Integrated Circuits and Systems, 15(12),» 1996..
 - [6] M. R. G. e. D. S. Johnson, «A guide to the theory of NP -completeness. W.H. Freeman & Company,,» 1979..
 - [7] H. D. e. U. Finke, «Cutting and Packing in Production and Distribution: Typology and Bibliography.,» Springer-Verlag, New York,, 1992..
 - [8] K. A. D. e. W. B. Dowsland, «Packing problems. European Journal of Operational Research, 56(1),» 1992..
 - [9] G. S. e. J. T. :. Harald Dyckhoff, «Annotated Bibliographies in Combinatorial Optimization (M. Dell'Amico, F. Maffioli, Silvano Martello), chapitre Cutting and Packing (C&P),» Chichester,, 1997..
 - [10] P. C. G. e. R. E. Gomory, «A linear programming approach to the cutting stock problem – part II. Operations Research, 11,,» 1963..
 - [11] G. K. e. G. W. :. Edmund K. Burke, «A new placement heuristic for the orthogonal stock-cutting problem. Operations Research, 52(4),» 2004..
 - [12] F. K. M. Y. W. e. E. C. X. Glauber Cintra, «Algorithms for two-dimensional cutting stock and strip packing problems using dynamic programming and column generation.,» European Journal of Operational Research, 191,, novembre 2008..
 - [13] U. P. e. D. P: Hans Kellerer, «Knapsack Problems, » Springer, Berlin, Germany, 2004.
 - [14] S. M. e. D. V. Andrea Lodi, «Heuristic and metaheuristic approaches for a class of two-dimensional bin packing problems.,» SIAM Journal on Computing 11(4), 1999..
-

- [15] E. Hopper, «Two-dimensional Packing utilising Evolutionary Algorithms and other Meta-Heuristic Methods,» Degree of Doctor of Philosophy, University of Wales, Cardiff School of Engineering, May 2000.
 - [16] Azzouz Hamza.-Mlata Ibrahim Elkhail.Yahyaoui. Zakaria, «Modélisation et optimisation de l'espace en utilisant le « Nesting »,» Projet Fin d'Etude Master 2 Genie Industriel, Université Aboubekr Belkaid de Tlemcen, 2016/2017.
 - [17] C. K. B. YTHIP, «Algorithmes Heuristiques et Evolutionnistes : Application à la Résolution du Problème de Placement de Formes Irrégulières,» Pour obtenir le grade de Docteur, L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIQUES DE LILLE , 9 octobre 1998 .
 - [18] L.-C. e. al, «Approche hyper-heuristique,» 2013,2014.
 - [19] T.-M. e. al, «Approche hyper-heuristique,» 2008.
 - [20] Jakobs, «l'algorithme Botton-Left(BL),» 1996.
 - [21] L. e. Teng, «l'algorithme bas à gauche(BLLT),» 1999.
 - [22] H. e. M'Hallah, «Aproche constructive,» 2003.
 - [23] S. e. Bennell, «Problème de stock de coupe de forme irrégulière,» 2014.
-

Résumé

Les problèmes de Nesting et Packing sont des problèmes d'optimisation combinatoire avec de nombreuses applications dans divers domaines tels que l'industrie de l'acier et du vêtement et la conception des circuits intégrés. Depuis plusieurs décennies, le domaine de Nesting attire de nombreux chercheurs et praticiens. En fonction des applications, il faut résoudre différents types de problèmes de Nesting et Packing. Dans cette Mémoire, nous décrivons le Nesting des formes irrégulières comme une liste des pièces quelconque doit être emballée dans une feuille (rectangle) bien définie, de sorte qu'aucunes des pièces ne se chevauchent et ils doivent être complètement emballés dans la surface rectangulaire.

Mots clés : Nesting, packing, feuille, irrégulières

Abstract

The problems of Nesting and Packing are combinatorial optimization problems with many applications in various fields such as the steel and garment industry and the design of integrated circuits. For decades, the Nesting estate has attracted many researchers and practitioners. Depending on the application, you need to solve different types of Nesting and Packing problems. In his Memoir, we describe the Nesting of Irregular Shapes as a list of any pieces to be wrapped in a well-defined (rectangle) sheet, so that no pieces overlap and they must be completely wrapped in the rectangular surface.

Keywords: Nesting, packing, sheet, irregular.

ملخص

مشاكل التراكب والتعبئة هي مشاكل أمثلية اندماجية مع العديد من التطبيقات في مجالات مختلفة مثل صناعة الحديد والملابس وتصميم الدارات الكهربائية المدمجة. لعدة عقود، مجال التراكب والتعبئة جذب اهتمام العديد من الباحثين. اعتماداً على عدة تطبيقات، أنواع مختلفة من مشاكل التراكب والتعبئة احتاجت إلى حل. في هذه المذكرة قدمنا شرحاً لمشاكل تراكب ثنائي الأبعاد خاص بالقطع غير منتظمة كقائمة لمجموعة قطع غير منتظمة يتم لفها في صفائح (مستطيلة) معرفة، بحيث لا تتداخل أي قطع ويجب أن تكون ملفوفة بالكامل في السطح المستطيل.

الكلمات المفتاحية: التراكب ، والتعبئة ، ورقة ، قطع غير منتظمة.

